

UNIVERSITE CLAUDE-BERNARD - LYON

- MEDECINE -

U. E. R. LYON-NORD

Année 1977 - N° 388

**EVOLUTION DE LA CAPACITE PHYSIQUE
(AEROBIE et ANAEROBIE)
CHEZ L'ENFANT SPORTIF OU SEDENTAIRE
DE 10 à 15 ANS**

THÈSE

présentée

à l'Université Claude-Bernard - LYON

et soutenue publiquement le 27 Septembre 1977
pour obtenir le grade de Docteur en Médecine

par

Michèle GRANDMONTAGNE née GERMAIN

le 13 Juin 1953

à LYON (Rhône)

UNIVERSITE CLAUDE-BERNARD - LYON

- MEDECINE -

U. E. R. LYON-NORD

Année 1977 - N° 388

**EVOLUTION DE LA CAPACITE PHYSIQUE
(AEROBIE et ANAEROBIE)
CHEZ L'ENFANT SPORTIF OU SEDENTAIRE
DE 10 à 15 ANS**

THÈSE

présentée

à l'Université Claude-Bernard - LYON

et soutenue publiquement le 27 Septembre 1977

pour obtenir le grade de Docteur en Médecine

par

Michèle GRANDMONTAGNE née GERMAIN

le 13 Juin 1953

à LYON (Rhône)

UNIVERSITE CLAUDE-BERNARD - LYON

- MEDICINE -

U. E. R. LYON-NORD

Année 1977 - N° 288

EVOLUTION DE LA CAPACITE PHYSIQUE
(AEROBIE et ANAEROBIE)
CHEZ L'ENFANT SPORTIF OU SEDENTAIRE
DE 10 à 15 ANS



THÈSE

présentée

à l'Université Claude-Bernard - LYON
et soutenue publiquement le 27 septembre 1977
pour obtenir le grade de Docteur en Médecine

par

Michèle GRANDMONTAGNE née GERMAIN

le 13 juin 1953

à LYON (Rhône)

UNIVERSITE CLAUDE BERNARD LYON I

Président de l'Université : Professeur D. GERMAIN

Premier Vice-Président : Professeur E. ELBAZ

Deuxième Vice-Président : B. ROUSSET

Troisième Vice-Président : R. LOPEZ

Secrétaire Général : M. RAMBAUD

UNITES D'ENSEIGNEMENT ET DE RECHERCHE DE L'UNIVERSITE

MEDECINE Grange-Blanche : Directeur : Docteur SALLE (M.C.A)

Alexis Carrel : Directeur : Professeur MORNEX

Sud-Ouest : Directeur : Professeur NORMAND

Lyon-Nord : Directeur : Docteur NEIDHARDT (M.C.A)

Directeur Honoraire : Professeur A. BERTOYE

BIOLOGIE HUMAINE : Directeur : Professeur REVILLARD J.P

TECHNIQUES DE READAPTATION : Directeur : Docteur MORGON (M.C.A)

SCIENCES PHARMACEUTIQUES : Directeur : Professeur BIZOLLON C.

SCIENCES ODONTOLOGIQUES : Directeur : Professeur VINCENT R.

INSTITUT REGIONAL D'EDUCATION PHYSIQUE ET SPORTIVE :

Président du Conseil de l'U.E.R : Professeur R. GUILLET

Directeur : M. MILLON A.

MATHEMATIQUES : Directeur : Professeur E. COMBET

PHYSIQUE : Directeur : Professeur J. DELMAU

CHIMIE ET BIOCHIMIE : Directeur : Professeur J. HUET

SCIENCES DE LA NATURE : Directeur : Professeur R. GINET

SCIENCES PHYSIOLOGIQUES : Directeur : Professeur WORDE J.F.

INSTITUT UNIVERSITAIRE DE TECHNOLOGIE N°1 : Directeur : Professeur POUYET

INSTITUT UNIVERSITAIRE DE TECHNOLOGIE N°2 : Directeur : M. GALLET J.

(Directeur E.N.S.A.M)

OBSERVATOIRE : Directeur : M. MONNET Guy

PHYSIQUE NUCLEAIRE : Directeur : Professeur GUSAKOW

MECANIQUE : Directeur : Mle COMTE BELLOT

THESE DE Michèle GRANDMONTAGNE

COMPOSITION DU JURY

PRESIDENT : Monsieur le Professeur J. F. CIER

ASSESSEURS : Monsieur le Professeur R. FLANDROIS
Monsieur le Professeur J. R. LACOUR
Monsieur le Docteur M. SCHMITT (M.C.A.)

A CLAUDE

A MA FAMILLE

A MES AMIS

avec toute mon affection.

Au Président de mon jury de Thèse

Monsieur le Professeur J.F. CIER

Son accueil bienveillant au laboratoire de Physiologie A, l'étendue de ses connaissances et la clarté de son raisonnement m'ont profondément marqué.

Sa présence dans ce jury est, pour moi, un grand honneur pour lequel je le remercie vivement.

A mes juges

Monsieur le Professeur R. FLANDROIS

C'est dans son laboratoire que j'ai appris à aimer la Physiologie. Sa compétence, ses conseils, sa gentillesse sont à l'origine de ma vocation.

Je tiens à lui exprimer toute ma gratitude pour les encouragements qu'il n'a cessé de me prodiguer depuis le début de ce travail.

Monsieur le Professeur J.R. LACOUR

Je le remercie de s'être intéressé à mon travail et d'avoir bien voulu le juger.

Monsieur le Docteur M. SCHMITT (M.C.A.)

Il a accepté avec gentillesse de juger ce travail; qu'il trouve ici le témoignage de ma profonde reconnaissance.

A mes maîtres de stages hospitaliers

Messieurs les Professeurs	E. LEJEUNE
	J. FAYOLLE
	M. BETHENOD
	F. CHARVET
	A. GARDE
	R. BRETTE

A tous ceux qui m'ont aidé à réaliser ce travail

Je tiens à exprimer ma reconnaissance envers tous mes amis du laboratoire de Physiologie A qui m'ont assisté tout au long de ce travail aussi bien pour la confection du matériel nécessaire que pour la réalisation pratique des tests.

Je remercie tout particulièrement Marie-Hélène MAYET et Dominique DESPLANCHES qui, de plus, ont dessiné toutes les figures et Martine DESBROSSE qui en a assuré la dactylographie.

A tous les enfants qui ont collaboré, de toute leur énergie avec tant de gentillesse et de patience à mes expériences.

P L A N

CONCLUSIONS	89
BIBLIOGRAPHIE	91

L'aptitude physique d'un individu représente sa faculté à fournir un travail. Si le travail consiste à pratiquer une activité sportive, les performances de l'individu seront dépendantes de la bonne coordination des facteurs impliqués dans la capacité physique d'un sujet que l'on peut schématiser comme étant :

- les ressources énergétiques représentées à la fois par des processus aérobies et anaérobies et leur bonne utilisation par le muscle ;
- une activité neuromusculaire bien coordonnée par l'apprentissage de la technique du mouvement ;
- des facteurs psychologiques définissant la motivation du sujet et sa tactique du jeu.

Il apparaît donc que, pour apprécier la capacité physique d'un individu, le facteur le plus tangible est représenté par l'estimation des processus énergétiques nécessaires au muscle en activité. Trois tests évaluent les trois sources d'énergie du muscle :

- la détermination de la consommation maximale d'oxygène explore le métabolisme aérobie qui permet des exercices prolongés et les plus grandes dépenses énergétiques ;
- la détermination de la puissance maximale anaérobie rend compte de la facilité qu'a le muscle à utiliser, lors d'un exercice très intense et très bref, ses réserves anaérobies alactiques représentées par la phosphocréatine ;
- la mesure de la dette maximale d'oxygène estime les réserves anaérobies à la fois alactiques et lactiques disponibles lors d'un exercice qui dépasse les possibilités aérobies du muscle et qui l'épuise en quelques minutes. La part du métabolisme lactique est représentée par le taux maximal d'acide lactique produit en fin d'exercice.

Le présent travail porte sur la capacité physique dans une population d'enfants de 10 à 15 ans pratiquant régulièrement une activité sportive et une population réduite d'enfants témoins de 10 et 11 ans. En effet, il est particulièrement intéressant de mesurer, dès l'enfance, la capacité physique d'un individu car son organisme est en plein développement dans cette période pubertaire et prépubertaire.

Plusieurs auteurs (SHEPHARD 1969-1971, ERIKSSON 1971-1973) ont déjà noté que, si le métabolisme aérobie de l'enfant se distingue peu de celui de l'adulte, le métabolisme anaérobie, et plus particulièrement sa part lactique, se caractérise chez l'enfant par des possibilités très réduites (valeurs faibles de la dette d'oxygène, taux réduit d'acide lactique sanguin et cinétique plus rapide, équipement enzymatique musculaire incomplet).

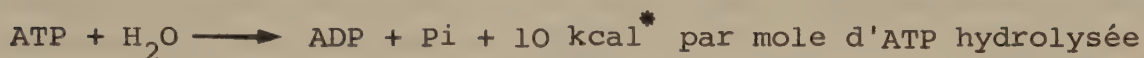
Après un rappel de la bioénergétique de l'exercice musculaire et de la méthodologie des tests pratiqués, nous avons étudié d'une part l'évolution, avec l'âge, des différentes composantes de la capacité physique de ces enfants en s'attachant surtout à la part anaérobie (puissance maximale anaérobie, dette maximale d'oxygène) et d'autre part l'influence éventuelle de la pratique régulière d'une activité sportive sur cette capacité physique et sur la répartition des diverses sources d'énergie selon le type de sport pratiqué. Pour cela, trois sports ont été retenus car différents par le métabolisme dominant :

- la natation, dont l'entraînement est caractérisé par des exercices de nage très prolongés (plusieurs kilomètres) qui mettent en jeu essentiellement les processus métaboliques aérobies de l'organisme ;
- l'athlétisme. Cette discipline sportive comporte de multiples formes d'activité mais nous avons plus particulièrement étudié la course de vitesse et le demi-fond qui mettent en jeu respectivement le métabolisme anaérobie alactique et le métabolisme anaérobie lactique ;
- le football dont les règles de jeu impliquent pendant une durée prolongée une succession de courses rapides et brèves. La pratique de ce dernier sport nécessite l'utilisation des possibilités aérobies et anaérobies du muscle.

- I - LES SOURCES D'ENERGIE DE LA CONTRACTION MUSCULAIRE

1 - L'adénosine tri-phosphate (ATP)

Le muscle utilise pour sa contraction, de manière exclusive, l'énergie libérée par l'hydrolyse d'une liaison dite "riche en énergie" d'une molécule d'ATP selon la réaction :



Cette énergie chimique est alors transformée d'une part en travail mécanique par les systèmes contractiles des fibres musculaires et d'autre part en chaleur avec un rendement qui varie avec le type d'exercice mais étant en moyenne voisin de 25 %.

Le muscle contient de l'ATP à une concentration d'environ 4 mmoles par kg de muscle frais (KARLSSON et coll. 1970). Pour un exercice mettant en jeu une masse musculaire de 25 kg (membres inférieurs), la quantité d'ATP disponible sera de 100 mmoles ce qui représente une réserve d'énergie de 1 kcal. Or, lors d'une course à pied sur terrain plat à 10 km/h, l'énergie dépensée sera de l'ordre de 0,1 kcal par mètre parcouru (MARGARIA et coll. 1963). Donc, très rapidement, tout le stock d'ATP serait épuisé, empêchant la poursuite de l'exercice faute de substrat énergétique.

Mais l'étude de la concentration en ATP du muscle montre une discrète diminution au début de l'exercice pour ensuite atteindre un niveau stable très proche de la valeur de repos pendant toute la durée du travail (BERGSTROM, 1967). De même, à la

* L'unité d'énergie dans le système international est le Joule (J). Cependant, en physiologie, on utilise encore la calorie (cal) et son multiple la kilocalorie (1 kcal = 10^3 cal) pour mesurer les quantités de chaleur libérées ou consommées lors des réactions énergétiques dans l'organisme. Le rapport des deux unités (1 cal = 4,19 J) représente l'équivalent calorifique.

fin d'un exercice particulièrement épuisant, les réserves musculaires d'ATP ne sont, au maximum, diminuées que de 40 % (MARECHAL, 1972).

2 - La resynthèse de l'ATP

Si la concentration d'ATP dans le muscle en activité ne varie que très peu, c'est qu'il existe des systèmes de recharge énergétique qui ont pour but de restituer l'ATP dégradé au fur et à mesure de son utilisation (fig. 1).

Ces processus qui sont au nombre de trois se différencient par leur latence de mise en jeu, leur capacité et leur puissance.

a) la phosphocréatine

La phosphocréatine (P.C) constitue une réserve de liaisons dites "riches en énergie". L'ATP sera resynthétisé à partir de l'adénosine di-phosphate (ADP) par transphosphorylation de la P.C selon la réaction :



La P.C est présente dans le muscle à une concentration de 15 à 20 mmoles par kg. Sa dégradation intervient dès le début de l'exercice d'abord très rapidement pendant les deux premières minutes puis plus lentement jusqu'à l'arrêt de l'exercice. La concentration peut être voisine de zéro à la fin d'un exercice très intense (BERGSTROM, 1967). Enfin, cette P.C sera très rapidement resynthétisée pendant les quelques premières minutes succédant à l'arrêt du travail (2 à 4 minutes en moyenne).

Ce processus se caractérise donc par :

- l'instantanéité de sa mise en route,
- une capacité réduite à 4 à 5 kcal car la dégradation est très rapide,
- mais par contre une puissance très importante puisqu'il

FIGURE 1

Schéma des processus énergétiques de la contraction musculaire.

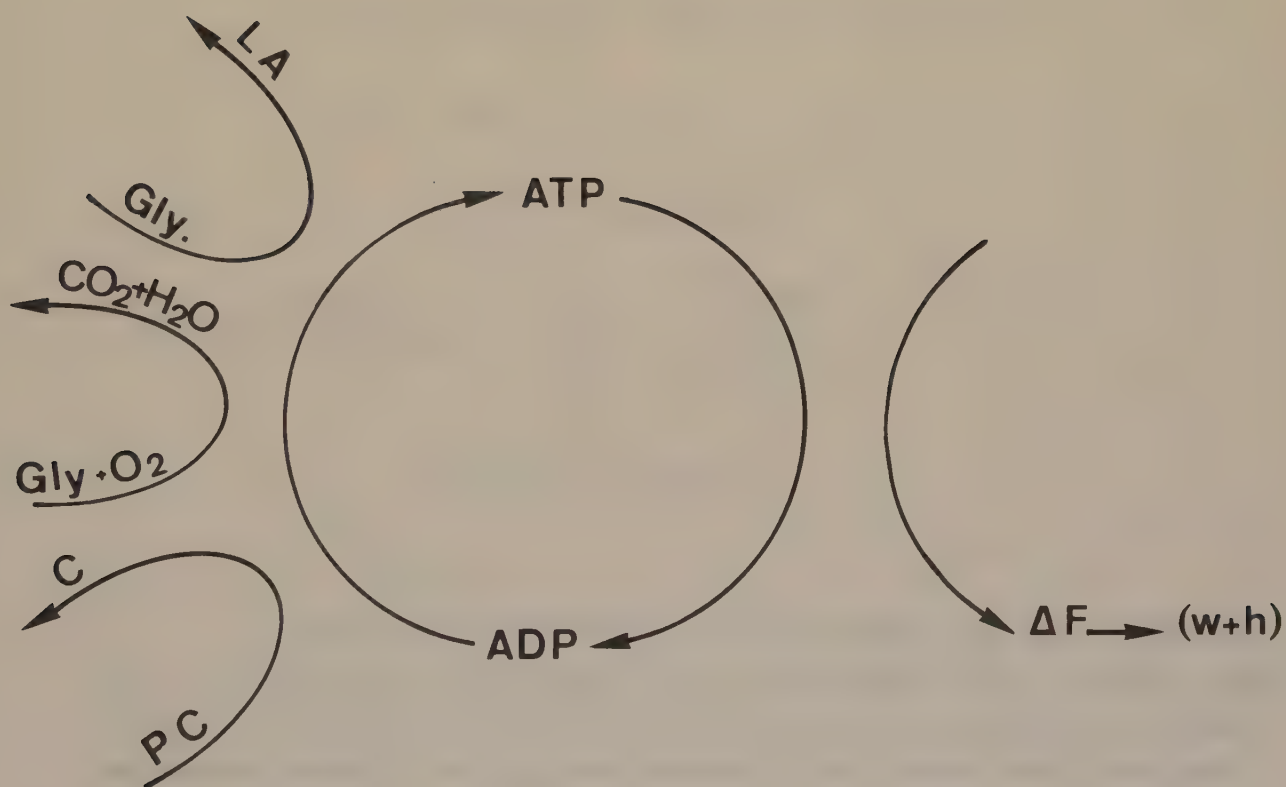
Glyc : glycogène,

LA : acide lactique,

PC : phosphocréatine, C : créatine,

F : énergie libre.

(d'après DI PRAMPERO, 1972).



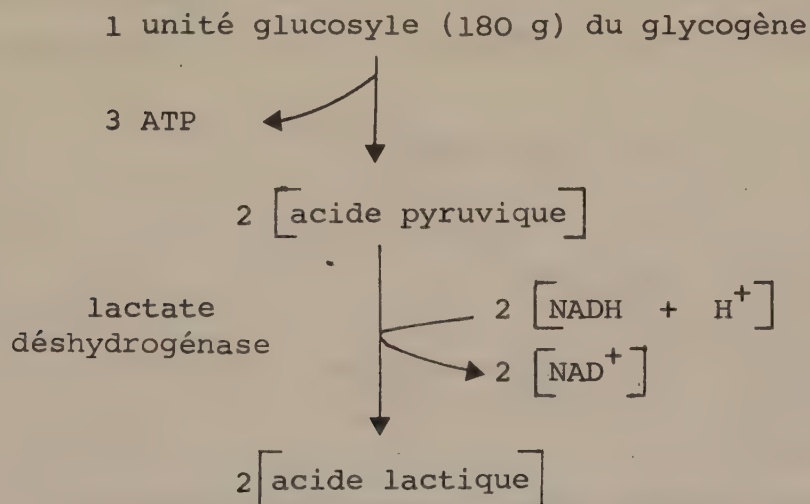
permet des dépenses d'énergie de l'ordre de $100 \text{ kcal} \cdot \text{min}^{-1}$.

b) la glycolyse cytoplasmique anaérobie

La glycolyse est l'ensemble des réactions biochimiques qui vont permettre la transformation du glycogène des réserves musculaires (glycogénolyse) en acide pyruvique par l'intermédiaire du glucose-6-phosphate. (HULTMAN. 1967).

C'est un processus essentiellement anaérobie et extra-mitochondrial.

L'acide pyruvique est ensuite transformé, dans le muscle en anaérobiose, en acide lactique par fixation d'un ion H^+ sur la molécule d'acide pyruvique.



Lors de la dégradation du glycogène en acide lactique par la voie de la glycolyse, il y a formation de 3 ATP par molécule de glucose-6-phosphate utilisé ou par 2 molécules d'acide lactique produit, ce qui correspond à la libération d'environ 30 kcal.

Ce processus se différencie du précédent par :

- une inertie discrète de l'ordre de quelques secondes,
- une capacité limitée par l'aptitude qu'a le muscle à supporter des concentrations élevées en lactate. En effet, l'accumulation d'acide lactique dans le muscle entraîne une acidose qui

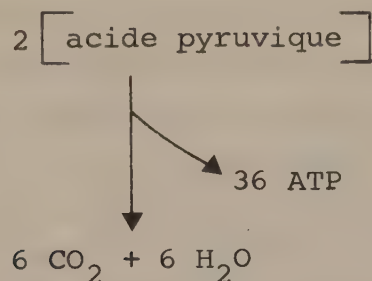
inhibe les processus enzymatiques et rend l'exercice insoutenable. Les quantités maximales de lactate trouvées chez des sujets entraînés étant de l'ordre de 135 g, il est donc possible de fixer la capacité maximale de la glycolyse à environ 22,5 kcal (MARGARIA et coll. 1964-1971).

- une puissance de l'ordre de 50 kcal.min⁻¹.

c) la glycolyse aérobie

Elle utilise par l'intermédiaire du cycle de Krebs et de la chaîne respiratoire les réserves glucidiques de l'organisme et conduit à une dégradation totale du glycogène en gaz carbonique et en eau.

Ainsi, la transformation de 2 moles d'acide pyruvique en présence d'oxygène fournit 36 moles d'ATP ce qui représente la plus grande source d'énergie disponible pour le muscle.



L'oxygène est présent dans le muscle sous deux formes :

- la myoglobine : réserve musculaire d'oxygène de l'ordre de 0,5 litre (ASTRAND I. et coll. 1960),
- l'hémoglobine : réserve sanguine variable avec le débit du sang dans le muscle en activité.

En début d'exercice, le muscle épuisera rapidement ses réserves d'oxygène sous forme de myoglobine. L'oxygène sera alors apporté au muscle par la circulation sanguine qui va s'adapter, avec un certain délai, aux besoins accrus de l'organisme en activité (augmentation du débit cardiaque).

Les principales caractéristiques de la glycolyse aérobie sont :

- une grande inertie puisqu'il faut au moins une minute pour que la consommation d'oxygène atteigne son intensité maximale,
- une puissance moyenne de l'ordre de 15 à 20 kcal.min⁻¹, la consommation maximale moyenne d'oxygène étant d'environ 3 à 3,5 l.min⁻¹,
- mais une capacité énorme permettant des exercices intenses et prolongés : on peut en effet maintenir pendant 6 à 8 minutes un effort correspondant à sa consommation maximale d'oxygène ce qui représente une capacité de 2500 à 3000 kcal.

3 - Conclusion

La figure 2 résume l'étude des trois processus énergétiques disponibles au cours du temps pour le muscle en activité.

Ces caractéristiques mettent en évidence l'importance relative, dans l'approvisionnement énergétique du muscle, des différents métabolismes anaérobies ou aérobie.

Si la puissance de l'exercice est telle qu'elle conduit à l'épuisement en moins de 2 minutes, la presque totalité de l'énergie proviendra d'abord des réserves en phosphocréatine du muscle puis de la glycolyse anaérobie. Si l'exercice peut être prolongé au-delà de cette limite, la part du métabolisme aérobie devient prépondérante grâce à l'adaptation de l'approvisionnement en oxygène du muscle alors que les ressources du métabolisme anaérobie s'épuisent (figure 3).

FIGURE 2 - Caractéristiques des trois processus d'apport d'énergie au muscle (temps représenté sur une échelle logarithmique).
D'après HOWALD H. 1974.

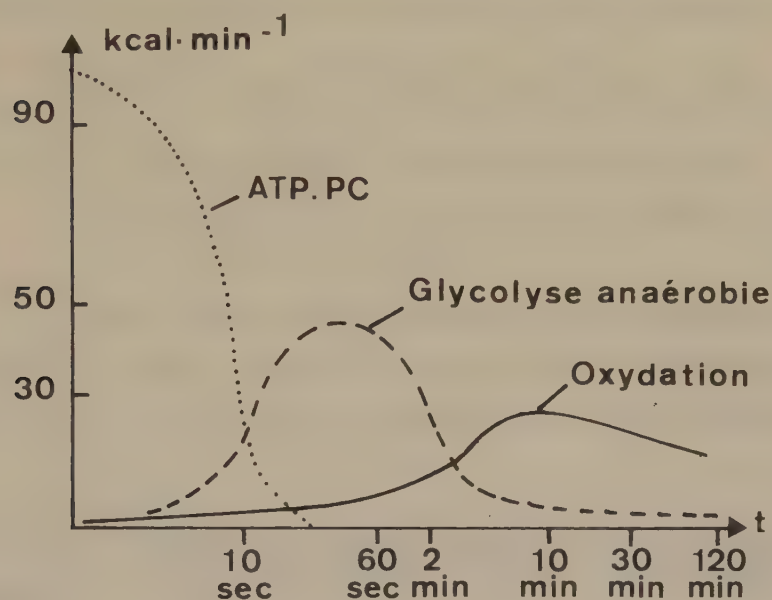
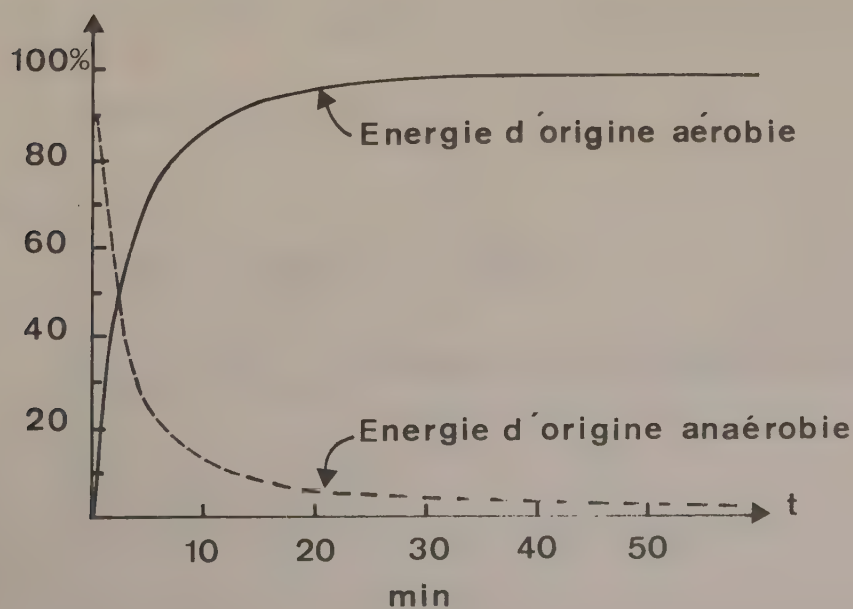


FIGURE 3 - Contribution relative, exprimée en %, de l'apport total d'énergie, des processus aérobie et anaérobies lors d'exercices maximaux de différentes durées (D'après ASTRAND et RODAHL 1970).



- II - BASES PHYSIOLOGIQUES AUX TESTS D'APTITUDE PHYSIQUE

Nous venons de définir trois mécanismes énergétiques qui assurent au muscle en activité une recharge constante en ATP.

Ce sont, dans l'ordre chronologique de mise en jeu :

- le métabolisme anaérobie alactique,
- le métabolisme anaérobie lactique,
- le métabolisme aérobie.

Trois tests vont permettre une approche aussi complète que possible de l'aptitude physique des individus en évaluant la capacité ou la puissance de chacun de ces métabolismes.

1 - Le métabolisme aérobie : la consommation maximale d'oxygène.

Nous avons déjà noté la part prépondérante que prennent les processus aérobies au cours d'un grand nombre d'activités car ils représentent une source d'énergie pratiquement inépuisable. Aussi est-on souvent amené à déterminer l'aptitude physique d'un individu par l'étude isolée de la capacité maximale du métabolisme aérobie représentée par la mesure de la consommation maximale d'oxygène ($\dot{V}O_2 \text{ max}$).

a) définition de la consommation d'oxygène

La consommation d'oxygène ($\dot{V}O_2$) est la quantité d'oxygène inspirée moins celle expirée dans l'unité de temps (1 minute).

$$\dot{V}O_2 = \dot{V}_{IO_2} - \dot{V}_{EO_2}$$

ou encore :

$$\dot{V}O_2 = \dot{V}_I F_{iO_2} - \dot{V}_E F_{EO_2}$$

F_{iO_2} et F_{EO_2} représentant les fractions d'O₂ dans l'air

et le gaz expiré, $\dot{V}_I$ et $\dot{V}_E$ les volumes inspirés et expirés en une minute.

En pratique, on peut déterminer $\dot{V}O_2$ à partir de la mesure du volume expiré connaissant sa composition en O_2 et CO_2 . On détermine alors une relation entre $F_{E_{O_2}}$, $F_{E_{CO_2}}$ et $F_{i_{O_2}}$ appelée "oxygène vrai" ou "true O_2 " qui multipliée par $\dot{V}_E$ donne la consommation d' O_2 .

$$\dot{V}O_2 = \left\{ \frac{1 - F_{E_{O_2}} - F_{E_{CO_2}}}{1 - F_{i_{O_2}}} F_{i_{O_2}} - F_{E_{O_2}} \right\} \dot{V}_E \quad (\text{cf FLANDROIS, 1976})$$

$\dot{V}O_2$ est habituellement exprimé en litres STPD.min⁻¹ (conditions standard de pression barométrique et de température : pB = 760 mm Hg ; t = 0°C).

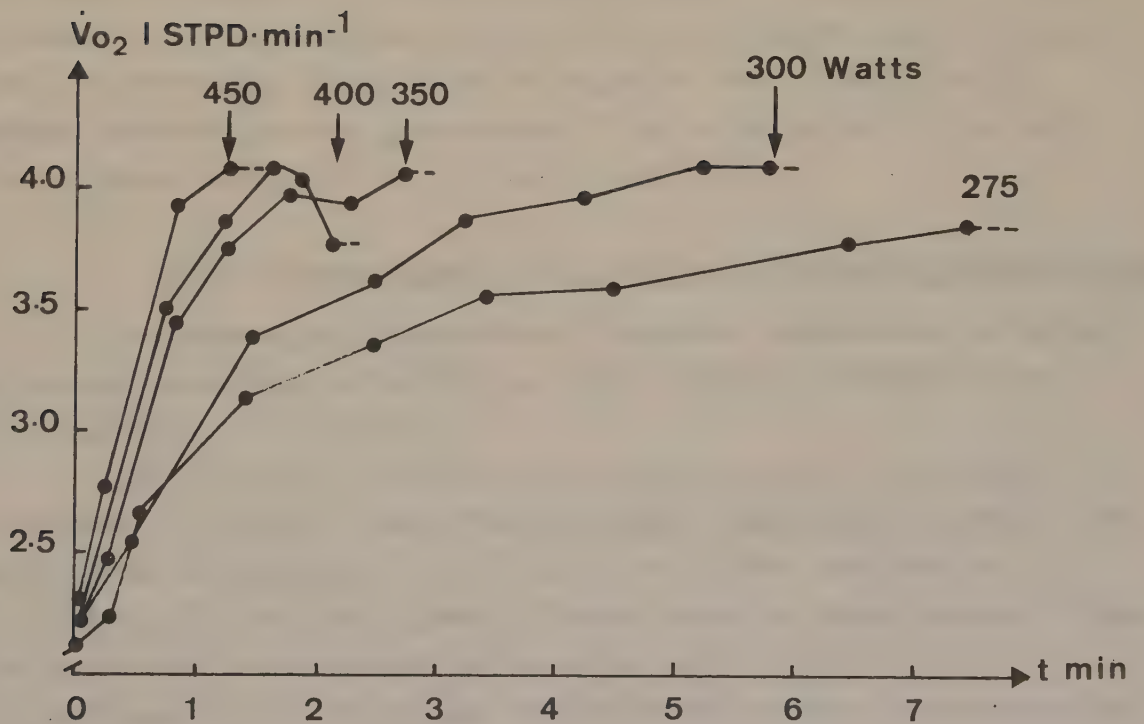
b) évolution de $\dot{V}O_2$ en fonction de la puissance de l'exercice. Définition de $\dot{V}O_{2 \text{ max}}$.

Chaque litre d'oxygène consommé par le sujet au cours de l'exercice représente une libération d'énergie de l'ordre de 5 kcal. La quantité d'énergie produite semble donc proportionnelle à la quantité d'oxygène consommé ($\dot{V}O_2$).

Pour un travail donné, d'intensité modérée, la consommation d'oxygène évolue dans le temps avec une certaine inertie puisque les mécanismes de prélèvement et d'apport de l'oxygène au muscle en activité demandent un délai de mise en route (adaptations respiratoire et circulatoire), (FLANDROIS et LACOUR. 1977).

On note, ainsi, une augmentation progressive de la consommation d'oxygène lors des premières minutes de l'exercice jusqu'à sa stabilisation à une valeur en plateau proportionnelle à la puissance développée lorsque l'apport d'oxygène aux muscles sera égal à leurs besoins. Cet état stable est atteint en général vers la troisième minute, Ceci d'autant plus rapidement que l'exercice est plus intense (figure 4). A l'arrêt de l'exercice, la

FIGURE 4 - Evolution en fonction du temps de la consommation d'oxygène chez un sujet qui fournit des exercices de puissances différentes après un échauffement de 10 minutes. Les flèches indiquent la survenue de l'épuisement. (D'après ASTRAND et SALTIN, 1961).



consommation d'oxygène redescend progressivement à sa valeur de repos. La figure 5 résume l'évolution de la consommation d'oxygène pendant et après un exercice. Mais dans ce paragraphe, nous ne nous intéressons qu'à l'état stable, les états transitoires correspondant au déficit et au paiement de la dette d'oxygène étant étudiés plus loin.

On a vu que la consommation d'oxygène, mesurée lorsqu'elle a atteint pour chaque charge son état stable, est proportionnelle à la puissance fournie jusqu'à ce qu'elle plafonne à une valeur maximale qu'elle ne peut dépasser même si la puissance développée augmente encore (figure 6). Il y a alors saturation du système transporteur d'oxygène et on mesure donc la capacité maximale des processus d'oxydation.

On appelle consommation maximale d'oxygène ($\dot{V}O_2 \text{ max}$) la valeur de plafonnement de la consommation d'oxygène et puissance maximale aérobie la plus petite puissance pour laquelle le $\dot{V}O_2 \text{ max}$ est atteint. A partir de ce seuil, l'exercice ne peut être poursuivi que quelques minutes (6 à 8 minutes) car le métabolisme se détourne, en absence d'oxygène, sur la voie de la glycolyse anaérobie avec production d'acide lactique ce qui entraîne acidose sanguine et douleurs musculaires.

c) valeurs moyennes de $\dot{V}O_2 \text{ max}$ et variations physiologiques

La consommation maximale d'oxygène représente une grandeur physiologique caractéristique pour chaque individu et en partie fixée par le génotype.

Chez l'adulte jeune de sexe masculin (20 à 30 ans), le $\dot{V}O_2 \text{ max}$ est, en valeur relative par rapport au poids du sujet, de l'ordre de $45 \text{ ml STPD} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ soit en valeur absolue de $3,0 \text{ l STPD} \cdot \text{min}^{-1}$ environ. Chez la femme dans la même tranche d'âge, les valeurs sont inférieures soit $40 \text{ ml STPD} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ et $2,2 \text{ l STPD} \cdot \text{min}^{-1}$. Il existe en fait de très grandes variations de $\dot{V}O_2 \text{ max}$ d'un individu à l'autre, les valeurs extrêmes connues étant de l'ordre de 25 à $85 \text{ ml STPD} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ (FLANDROIS et coll. 1962).

FIGURE 5 - Evolution de la consommation d'oxygène en fonction du temps, avant, pendant et après un exercice d'intensité modérée.
Surface A : déficit en oxygène ;
Surface B : paiement de la dette.

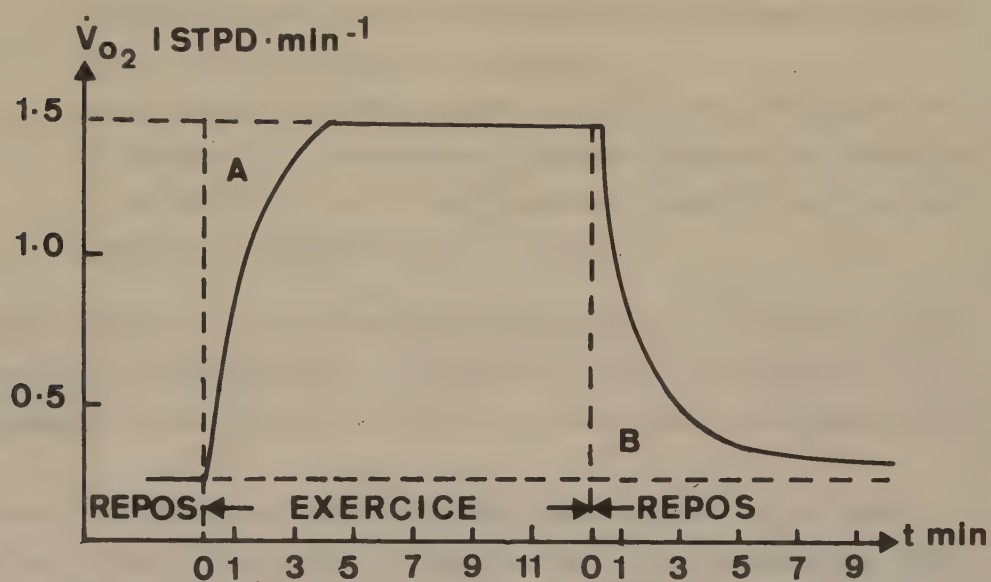
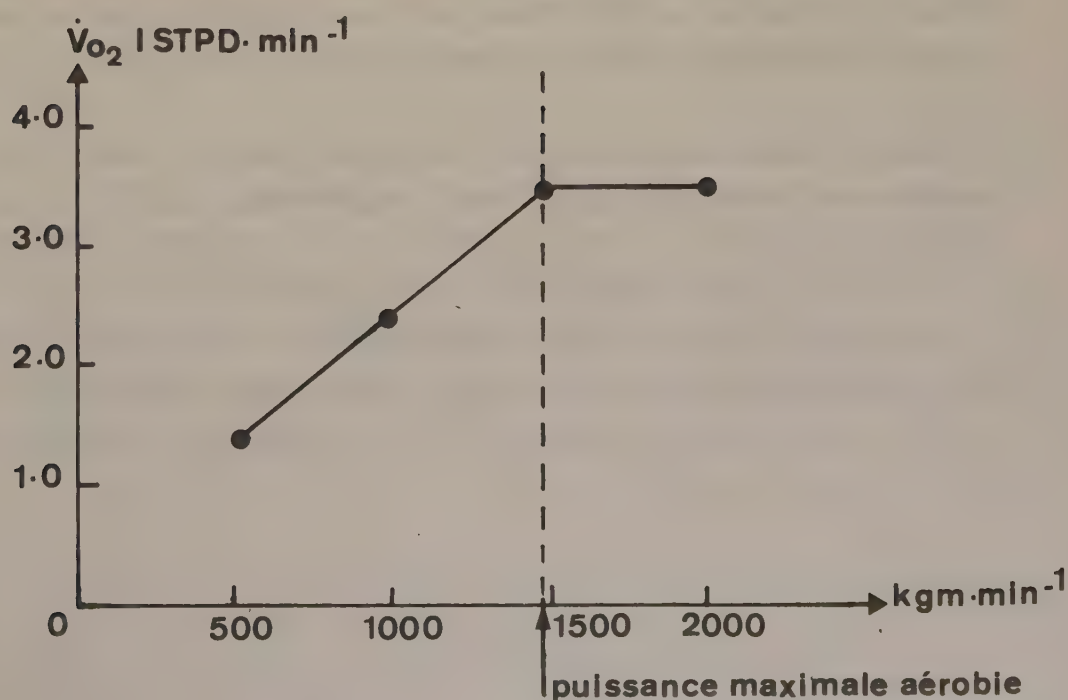


FIGURE 6 - Evolution de $\dot{V}O_2$ en fonction de la puissance de l'exercice.



Les facteurs physiologiques de variation de la consommation maximale d'oxygène sont essentiellement représentés par l'âge, le sexe et le degré d'entraînement.

. Une étude de $\dot{V}O_2$ max sur une population suédoise en fonction de l'âge et du sexe (ASTRAND I., 1967) montre :

- qu'avant la puberté, il n'y a pas de différence significative de la consommation maximale d'oxygène entre filles et garçons,
- que, dans les deux sexes, le $\dot{V}O_2$ max exprimé en $l \text{ STPD} \cdot \text{min}^{-1}$ augmente progressivement au cours de l'enfance et de l'adolescence jusqu'à une valeur maximale atteinte à 18-20 ans.

Rapportée à l'unité de poids corporel, la valeur maximale de $\dot{V}O_2$ max est atteinte dès l'enfance. Après la puberté, elle diminue constamment avec l'âge si le sujet mène une vie sédentaire.

. Mais, à côté de ces facteurs génétiques, il a été démontré que le niveau d'activité physique et l'entraînement bien adapté du sujet dans le sport qu'il pratique peuvent améliorer sa consommation maximale d'oxygène d'environ 10 à 20 % (EKBLÖM et coll., 1969 ; SHEPHARD, 1971). Cependant, selon des données plus récentes (HICKSON et coll., 1977) qui demandent confirmation, il semblerait que ce facteur "entraînement" soit beaucoup plus important puisque le $\dot{V}O_2$ max des sujets d'expérience est amélioré en moyenne de 40 % à l'issue des 10 semaines d'un entraînement particulièrement intensif.

Un travail récent pratiqué sur une population d'enfants lyonnais de 11 à 16 ans montre que, pour un groupe d'enfants sédentaires, le $\dot{V}O_2$ max est de l'ordre de $45 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ chez les garçons et de $38 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ chez les filles alors que, pour un groupe d'enfants pratiquant régulièrement une activité sportive, le $\dot{V}O_2$ max est supérieur aussi bien chez les garçons ($53 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$) que chez les filles ($50 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$) (BOTTIN, Thèse Lyon, 1977).

En somme :

Les phénomènes oxydatifs, dans le muscle en activité, représentent une source d'énergie considérable dont la part dans l'approvisionnement du muscle est d'autant plus grande que l'exercice est maintenu plus longtemps (100 % si la durée de l'exercice dépasse 20 minutes). L'appréciation de la capacité maximale de ces processus d'oxydation est donnée par la mesure de la consommation maximale d'oxygène, grandeur caractéristique de chaque individu fixée génétiquement mais pouvant cependant être améliorée dans certaines limites par la pratique régulière d'un sport.

On conçoit donc que plus le $\dot{V}O_2$ max d'un individu sera élevé, plus celui-ci sera apte à pratiquer une activité sportive dans la mesure où cette activité représente un exercice à la fois intense et prolongé (SALTIN et ASTRAND, 1967).

2) Le métabolisme anaérobie lactique : la dette maximale d'oxygène.

a) définition

L'étude de l'évolution de la consommation d'oxygène en fonction du temps (figure 5, page 14) a montré qu'en début d'exercice il se crée un déficit en oxygène dû au retard de l'adaptation du système transporteur d'oxygène par rapport aux besoins énergétiques du muscle. Lorsque l'exercice commence, le muscle qui ne peut encore disposer d'oxygène en quantité suffisante, va utiliser ses réserves anaérobies : dégradation de la phosphocréatine, source rapidement épuisée, mais surtout mise en jeu de la glycolyse anaérobie dont le témoin sera la production d'acide lactique, ces processus anaérobies jouant un rôle d'autant plus important que l'intensité de l'exercice est plus grande.

Au terme de l'exercice, la consommation d'oxygène décroît

progressivement. Elle reste supérieure à sa valeur de repos pendant un certain temps. Il existe donc un excédent par rapport à la valeur attendue qui s'explique par la nécessité de "payer" la dette d'oxygène contractée en début d'exercice.

On définit alors la dette d'oxygène comme étant la consommation d'oxygène après l'exercice moins sa valeur de repos mesurée pendant le même temps. La dette est maximale lorsque toute l'énergie apportée au muscle est fournie par le métabolisme anaérobie à la fois lactique et alactique.

Pour cela, il faut demander au sujet de développer une puissance plus importante que celle mettant en jeu au maximum les processus aérobies, et de maintenir cette puissance supra maximale pendant 2 minutes environ pour que la part aérobie des substrats énergétiques mis en jeu soit minime (cf figure 3).

b) la cinétique de la dette d'oxygène et l'influence de la puissance de l'exercice.

Le déficit en oxygène au début de l'exercice résulte de la somme de trois facteurs (DI PRAMPERO et coll., 1970) :

- la quantité d'énergie (rapportée à une consommation d'oxygène) fournie par l'hydrolyse des phosphates à liaisons riches en énergie = "dette alactique nette" ;
- le volume d'oxygène tiré des réserves de l'organisme (désaturation de la myoglobine et augmentation de la différence artério-veineuse (a - v) en oxygène par désaturation du sang veineux et très discrète accroissement de P_{aO_2}) ;
- la quantité de lactate (également rapportée à une consommation d'oxygène) produite au cours de la glycolyse lorsque le muscle est encore en anaérobiose.

Le déficit est globalement une fonction exponentielle croissante du temps ($t_{1/2} \simeq 30$ secondes).

Au cours de la récupération, s'ajoute au paiement de la dette contractée en début d'exercice, une élévation résiduelle du

métabolisme par rapport à sa valeur de repos pendant un temps beaucoup plus long (en moyenne une heure chez l'adulte). En effet, l'oxygène consommé pendant la récupération est destiné, en plus de la restitution des stocks musculaires de phosphocréatine et des réserves sanguines et musculaires en oxygène de l'organisme :

- à une utilisation accrue due à l'augmentation de la température centrale et musculaire de l'organisme et ceci d'autant plus que l'exercice est prolongé (DILL et coll. 1933, SALTIN et coll. 1966, BROOKS et coll. 1971) ;

- à une augmentation du travail ventilatoire et cardiaque, $\dot{V}_E$ et fréquence cardiaque décroissant comme $\dot{V}O_2$; (DAVIES et coll. 1972) ;

- et surtout à l'oxydation du lactate produit, la dégradation de l'acide lactique consommant deux fois plus d'oxygène que sa production (KREBS, 1964 ; ASTRAND et coll., 1964).

On peut définir la phase de récupération (dette d'oxygène) comme la somme de deux exponentielles dont l'une est analogue à celle du déficit ($t_{1/2} \approx 30$ secondes) = dette alactique et l'autre, liée au métabolisme de l'acide lactique = dette lactique, a une période beaucoup plus grande dont l'importance varie avec l'intensité de l'exercice : $t_{1/2} \approx 15$ à 20 minutes pour des exercices supra maximaux chez l'adulte (DI PRAMPERO, 1972).

c) la production d'acide lactique

Le témoin de l'utilisation de la voie de la glycolyse anaérobie est l'acide lactique.

Nous avons déjà noté que la production d'acide lactique en grande quantité lors d'un exercice qui met en jeu au maximum les processus énergétiques anaérobies de l'organisme est le facteur limitant la poursuite de l'exercice (acidose sanguine et douleurs musculaires). Ainsi, le taux d'acide lactique sera maximal dans les mêmes conditions que la dette d'oxygène.

L'étude de l'évolution de la concentration sanguine de l'acide lactique en fonction du temps montre que le taux maximal n'est atteint que plusieurs minutes après la fin de l'exercice. En

effet, le lactate produit au niveau du muscle en activité doit passer dans le milieu extracellulaire, en particulier dans le sang où il est dosé et cette diffusion demande un certain temps. Le délai est de l'ordre de 3 à 5 minutes chez l'adulte mais est plus bref chez l'enfant (2 minutes) où les passages dans les compartiments liquidiens de l'organisme sont plus rapides (SHEPHARD, 1971).

En somme :

Le métabolisme anaérobie représente, dans le muscle en activité, une réserve énergétique disponible dès le début de l'exercice mais dont la quantité est limitée puisque sa part devient négligeable après 20 minutes. La mesure de la dette maximale d'oxygène évalue à la fois les réserves musculaires de phosphocréatine et les possibilités de la glycolyse anaérobie dont le témoin est la production d'acide lactique. Ainsi, plus la valeur de ce test sera élevée, plus le sujet sera apte à fournir un exercice très intense (supra maximal) mais modérément long.

Puisque, selon certains auteurs (SHEPHARD, 1971 ; ERIKSSON, 1973), il semble que le métabolisme anaérobie soit peu important chez l'enfant (valeurs faibles de la dette d'oxygène et du taux d'acide lactique), nous avons étudié ce test chez l'enfant au cours de son développement pour en connaître l'évolution et les possibilités selon l'activité physique habituellement pratiquée.

3) le métabolisme anaérobie alactique : la puissance maximale anaérobie.

La puissance maximale du métabolisme anaérobie alactique peut être déterminée à partir d'un exercice très intense qui conduira le sujet à l'épuisement en quelques secondes. Dans ces conditions, en effet, compte tenu de la durée de l'effort, la seule source d'énergie est bien représentée par les réserves du muscle

en phosphocréatine (MARGARIA, 1969).

MARGARIA et coll. (1966) ont déterminé cette puissance maximale anaérobie alactique chez des sujets qui montaient aussi vite que possible un escalier de dimensions connues. Ils ont montré, alors, qu'une vitesse maximale est très rapidement atteinte en 1 à 2 secondes, qu'elle se maintient jusqu'à la 5ième seconde en moyenne pour diminuer ensuite (figure 7). Le délai pour atteindre cette vitesse maximale peut être diminué si le sujet dispose de 2 mètres pour une course d'élan avant l'ascension des escaliers (figure 8). On considère alors que tout le travail fourni par le sujet est utilisé pour augmenter le niveau de son énergie potentielle et que la puissance développée (puissance maximale anaérobie) est représentée par la composante verticale de la vitesse maximale (V_v) atteinte par le sujet au cours du test.

Il faut noter que cette mesure n'est qu'une approche indirecte de l'état des réserves en phosphocréatine et qu'elle ne représente que le débit d'utilisation de ce substrat énergétique par le muscle. C'est donc une estimation de la puissance maximale et non pas de la capacité maximale anaérobie alactique. En effet, si l'entraînement augmente les réserves musculaires en composés riches en énergie, les valeurs de ce test déterminées avant et après l'entraînement ne sont pas significativement différentes (HOUSTON et coll., 1977). En revanche, si la détermination de la puissance maximale anaérobie est pratiquée juste après un exercice mettant en jeu le métabolisme aérobie, la vitesse maximale atteinte est d'autant plus diminuée que la puissance aérobie développée est plus importante (MARGARIA et coll., 1971).

FIGURE 7 - Evolution de la composante verticale de la vitesse en fonction du temps chez deux sujets (D'après MARGARIA et coll., 1966).

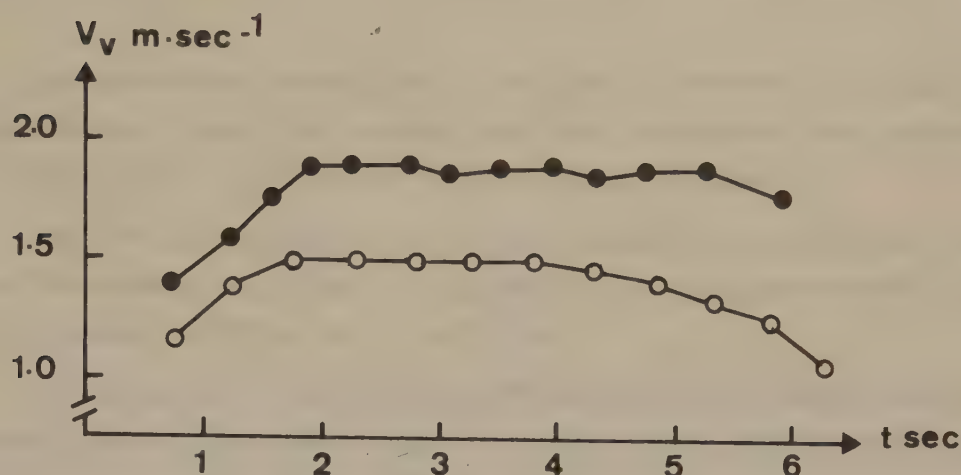
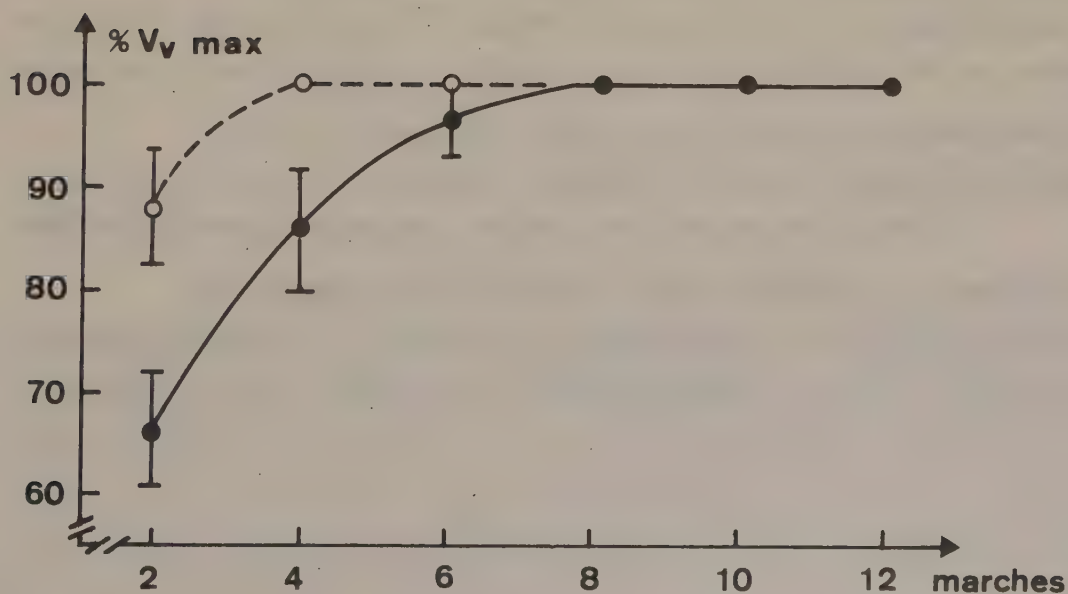


FIGURE 8 - Composante verticale de la vitesse en pourcentage de la vitesse maximale atteinte en fonction du nombre de marches franchies après le départ (MARGARIA et coll., 1966).
 Ligne continue : départ sans élan.
 Ligne discontinue : départ précédé d'une course horizontale de 2 mètres.



- III - METHODOLOGIE

Nous avons vu que les sources d'énergie utilisées au cours de l'exercice varient selon l'intensité et la durée de celui-ci :

- métabolisme anaérobie alactique (réserves musculaires de phosphocréatine) pour des exercices très intenses mais maintenus pendant un temps très court de l'ordre de 10 secondes ;

- métabolisme aérobie pour les exercices prolongés (supérieurs à 10 minutes) mais dont la puissance reste inférieure à la puissance maximale aérobie de l'individu ;

- métabolisme anaérobie lactique pour les exercices de type intermédiaire, intenses (supra maximaux) qui conduisent rapidement à l'épuisement (en moins de 10 minutes).

Nous allons donc étudier, par les trois tests décrits au chapitre précédent, la part relative que prennent ces métabolismes chez l'enfant selon le type d'activité physique pratiquée.

Trois sports ont été retenus car ils représentent chacun un genre différent d'exercice :

- la natation, exercice prolongé et intense, qui met en jeu essentiellement les processus métaboliques oxydatifs ;

- l'athlétisme, et plus particulièrement la course de vitesse, qui utilise de façon prédominante le métabolisme anaérobie alactique mais aussi lactique selon la longueur de la course ;

- et le football, sport qui, par la succession tout au long d'un match de courses rapides, utilise toutes les ressources métaboliques du muscle (oxydatives et anaérobies).

Une population témoin a été étudiée pour mettre en évidence, éventuellement, le rôle de la pratique d'une activité sportive sur l'évolution des différents métabolismes au cours du développement de l'enfant.

1 - Les sujets

a) les sportifs

Il s'agit d'enfants de 10 à 15 ans, garçons et filles, qui pratiquent régulièrement une activité sportive dans différents clubs de la région lyonnaise. Ils sont répartis en trois classes d'âge : 10-11 ans, 12-13 ans et 14-15 ans.

Les sports représentés sont :

- pour les filles et les garçons :
 - . la natation (11 filles et 12 garçons),
 - . l'athlétisme (4 filles et 13 garçons).
- pour les garçons seulement :
 - . le football (21 garçons).

Tous ces sportifs, choisis par leurs entraîneurs, ont subi les trois tests d'aptitude physique au laboratoire de Physiologie A à la faculté de Médecine de Lyon.

b) les témoins

L'étude de la population témoin n'a pu porter que sur la classe d'âge 10-11 ans, représentée par de jeunes enfants (9 garçons et 5 filles) du cours CM₁-CM₂ d'une école communale choisie dans un milieu rural aux environs de Lyon.

Les enfants témoins ont été testés sur place dans les locaux de l'école selon le même protocole que les jeunes sportifs.

2 - Le matériel employé

a) pour la détermination de la puissance maximale anaérobie.

- le système de chronométrage

On dispose d'un système de chronométrage précis au 1/100^e de seconde. Il est composé de deux cellules photo-électriques reliées à un chronomètre électronique. Chaque cellule est portée par une barre métallique verticale le long de laquelle elle peut coulisser. La lampe qui lui fait face est portée par une barre identique, les deux barres étant solidarisées par un pied transversal. (Photo n°1).

PHOTO n°1 : Cliché représentant le dispositif nécessaire à la détermination de la puissance maximale anaérobie. Le chronomètre est déclenché lors du passage du sujet devant la première cellule photo-électrique et il s'arrête quand le deuxième faisceau lumineux est coupé. La dénivellation entre les deux cellules photo-électriques est de 61 cm soit 4 marches de 15,25 cm.



- l'escalier

L'escalier utilisé aussi bien à la faculté qu'à l'école communale a des marches de 15 cm de haut en moyenne. Compte tenu du fait que, lors du test, les mesures sont prises entre la 4^{ième} et la 8^{ième} marche, la hauteur qui sépare les deux cellules photo-électriques est de 61 cm.

b) pour la détermination de la consommation maximale d'oxygène.

- l'ergomètre

Trois types différents d'ergomètre ont été utilisés :

. les sportifs, à l'exception des footballeurs, ont été testés sur bicyclette ergométrique de type COCHET, autorégulée de telle sorte que la vitesse de pédalage n'influence pas la puissance développée lors de l'exercice ;

. les sujets témoins ont utilisé une bicyclette de type MONARK plus facilement transportable sur les lieux des tests. La fréquence de pédalage a été fixée à 70 coups par minute ce qui représente une puissance de 300 kgm.min^{-1} par graduation;

. pour les footballeurs, compte tenu de leur plus grande habitude de courir, les tests ont été pratiqués sur tapis roulant à pente variable et dont la vitesse, contrôlée en début de séance, reste constante en cours d'exercice à 12 km par heure.

- le recueil des gaz expirés

Quel que soit l'ergomètre utilisé, le protocole reste le même pour la détermination de la consommation maximale d'oxygène.

Le sujet porte un masque souple qui englobe à la fois sa bouche et son nez. Le masque est fixé sur son visage par une bonnette à quatre sangles. Un jeu de soupapes permet la séparation de l'air inspiré et de l'air expiré. L'espace mort de l'ensemble est de l'ordre de 50 ml.

Un tuyau (VACUFLEX) de fort diamètre (35 mm) offrant le moins de résistance possible à l'écoulement de l'air, conduit les

gaz expirés dans un spiromètre de TISSOT. Un système de robinet à 3 voies situé à l'entrée du spiromètre permet de ne recueillir les gaz expirés qu'au moment de la mesure.

Un potentiomètre d'angle, solidaire de la poulie du spiromètre, permet d'enregistrer sur un SERVOTRACE les potentiels électriques directement proportionnels au volume expiré. L'enregistrement sur papier millimétré indique à la fois le volume expiré et le temps pendant lequel le recueil des gaz a été fait.

Pour les sujets témoins, un spiromètre de plus petit format a été utilisé. Le volume est alors lu directement sur l'échelle graduée, le temps de mesure étant relevé par chronométrage.

Le spiromètre est étalonné en début de séance et on relève chaque jour la pression barométrique et la température ambiante pour effectuer les conversions ATPS-BTPS ou ATPS-STPD.

- l'analyse des gaz

Le dispositif d'analyse comprend :

- . un analyseur rapide d'O₂ (cellule OM 11 Beckman),
 - . un analyseur rapide de CO₂ (cellule LB 2 Beckman),
- placés en série et qui pompent 200 ml de gaz par minute.

Le gaz expiré est séché avant analyse par passage sur drierite.

Les analyseurs sont étalonnés avant chaque séance de mesure. Le zéro des analyseurs est fait sur l'azote et des pompes WOSTHOFF montées en série fournissent un mélange gazeux de O₂, CO₂ et N₂ avec concentrations fractionnelles connues (O₂ = 15 % et CO₂ = 5 %).

c) pour la détermination de la dette maximale d'O₂.

- les mesures au repos

Le sujet est placé en position allongée dans un fauteuil "relax" où il reste pendant les 5 minutes que dure la mesure de sa consommation basale d'oxygène selon le même protocole que précédemment.

- l'exercice supra maximal

Il est réalisé sur l'ergomètre utilisé pour la détermination de $\dot{V}O_2$ max.

Par contre, le système de recueil des gaz expirés à la fin de l'exercice est différent :

. les gaz expirés sont recueillis dans des sacs de DOUGLAS par l'intermédiaire d'un robinet possédant une entrée et trois sorties dont chacune est munie d'un chronomètre pour déterminer exactement le temps de la mesure (Photo n°2).

. le tuyau reliant la soupape expiratoire à l'entrée du robinet doit être le plus court possible pour diminuer le décalage entre la valeur réelle de $\dot{V}O_2$ à la bouche du sujet et sa mesure dans le sac de DOUGLAS. On utilise le même tuyau pour les mesures sur tapis roulant ou sur bicyclette dont la longueur est de 1,50 m ce qui, compte tenu du diamètre de 35 mm, correspond à un volume d'air de 1,44 l.

d) pour la détermination du taux d'acide lactique sanguin.

Le prélèvement est pratiqué 2 minutes après l'arrêt de l'exercice maximal ou supra maximal compte tenu de la cinétique plus rapide de l'acide lactique chez l'enfant que chez l'adulte (SHEPHARD, 1971).

On prélève pour ce dosage 100 μ l de sang capillaire pris au bout du doigt après piqure par un vaccinostyl. Le sang est aspiré dans une micropipette et subit tout de suite une déprotéinisation dans 300 μ l d'acide métaphosphorique à 5 %. Le tout est conservé au réfrigérateur à 4°C et dosé dans un délai moyen d'une semaine selon une méthode enzymatique (MARBACH et WEIL 1967, QUARD et coll. 1977).

3 - La réalisation pratique des tests au laboratoire

La détermination des trois composantes de l'aptitude physique chez les sujets testés nécessite au minimum deux séances :

- l'une pour la mesure de la puissance maximale anaérobie

PHOTO n°2 : Cliché représentant le système de robinets chronométrés utilisé pour le fractionnement minuté des gaz expirés lors de la mesure de la dette maximale d'oxygène. Le passage sur une des voies du robinet déclenche automatiquement le chronomètre correspondant en arrêtant celui de la voie précédente.



et du $\dot{V}O_2$ max,

- l'autre pour la mesure du $\dot{V}O_2$ au repos et de la dette maximale d'oxygène puisqu'elle nécessite la connaissance de la puissance maximale aérobie et que ces deux exercices sont trop fatigants pour être pratiqués l'un à la suite de l'autre.

On remplit pour chaque enfant une fiche où sont notés essentiellement son âge, son poids et son niveau d'activité physique (sport pratiqué, gymnastique scolaire et performances).

a) mesure de la puissance maximale anaérobie

- définition

MARGARIA (1966) définit ce test comme équivalent à la mesure de la composante verticale de la vitesse maximale atteinte en courant aussi rapidement que possible dans un escalier de pente connue. Il considère alors que l'énergie dépensée est utilisée uniquement pour augmenter l'énergie potentielle du sujet.

L'escalier utilisé est conforme à la description de MARGARIA qui préconise une hauteur du pas de 30 à 38 cm pour obtenir une valeur réellement maximale de la vitesse. En effet, un pas trop grand augmente l'effort et le temps de contraction musculaire alors qu'un pas trop faible diminue le rendement de l'exercice en augmentant la fréquence de piétinement.

Le sujet dispose de deux mètres avant la première marche de l'escalier pour une course d'élan ce qui permet de placer la première cellule photo-électrique dès la 4^{ième} marche et la seconde sur la 8^{ième} marche. Le faisceau lumineux est réglé pour être à la hauteur du genou.

- l'épreuve

On demande alors au sujet de s'élancer le plus rapidement possible dans l'escalier en posant un pied toutes les deux marches. Ainsi, il coupe chaque faisceau lumineux dans la même position de jambe, genou en avant. La dénivellation totale, h , est de 61 cm comportant deux pas de 30,5 cm.

Le chronomètre se déclenche lorsque le premier faisceau

lumineux est interrompu et s'arrête au passage devant la deuxième cellule. On lit directement le temps, t , affiché en $1/100^e$ de seconde sur un voltmètre numérique.

L'épreuve est répétée 5 fois de suite en veillant à la bonne exécution du test. La première valeur n'est pas retenue car elle représente la familiarisation du sujet au test. La valeur maximale est atteinte en moyenne au troisième essai.

- calcul

On peut donc aisément calculer la puissance externe fournie ($P_{\max \text{ an.}}$) comme étant le produit de la composante verticale de la vitesse maximale (V_V) par le poids du sujet

$$P_{\max \text{ an.}} (\text{kgm}.\text{sec}^{-1}) = V_V \times \text{poids} = \frac{h}{t} \times \text{poids}$$

et l'énergie endogène requise compte tenu du rendement de l'exercice qui est de 25 % en consommation d'O₂ équivalente sachant que 1 kgm correspond à 0,47 ml d'O₂.

Les résultats sont le plus souvent rapportés à l'unité de poids et dans ces conditions, la puissance maximale anaérobie en $\text{kgm}.\text{kg}^{-1}.\text{sec}^{-1}$ correspond à la composante verticale de la vitesse ($\text{m}.\text{sec}^{-1}$).

$$P_{\max \text{ an.}} \text{ kg}^{-1} = V_V = \frac{h}{t} (\text{m}.\text{sec}^{-1})$$

b) mesure de $\dot{V}O_2 \text{ max}$

- l'échauffement

L'expérience montre que les résultats obtenus sont meilleurs si un échauffement préalable des sujets est pratiqué avant l'épreuve de détermination de $\dot{V}O_2 \text{ max}$.

Pour cela le sujet, en tenue de sport, est installé sur le cycloergomètre en ayant soin de bien régler la selle à une hauteur convenable.

On place sur sa poitrine trois électrodes qui permettront de suivre l'évolution de la fréquence cardiaque au cours de l'exercice (2 électrodes latérothoraciques droite et gauche et une dorsale

reliant le sujet à la terre.

Un masque respiratoire adapté au visage de l'enfant est fixé soigneusement pour éviter les fuites.

On détermine alors une puissance d'échauffement variable avec le poids et l'âge du sujet, choisie de telle manière que la fréquence cardiaque soit d'environ 150 pulsations par minute à la fin de l'échauffement.

La période d'échauffement dure 5 minutes et la fréquence cardiaque, contrôlée en cours d'exercice sur l'affichage numérique du cardiotachymètre, est enregistrée dans les 30 dernières secondes.

- le choix de la puissance

La fréquence cardiaque mesurée en fin d'échauffement va permettre, grâce à une "estimation" grossière de $\dot{V}O_2$ max à partir de l'abaque d'ASTRAND et RYHMING, de limiter à 3 ou 4 le nombre de paliers nécessaires pour atteindre celui correspondant à la puissance maximale aérobie en se plaçant au départ à environ 80 % de cette valeur supposée. Chaque palier correspond à une augmentation de 20 Watts.

- la détermination du $\dot{V}O_2$ max

On utilise la méthode triangulaire du laboratoire.

L'épreuve dure en moyenne 5 à 6 minutes, chaque palier devant être maintenu pendant une minute et demie.

Pendant les trente dernières secondes de chaque palier, on mesure :

- . le volume expiré, $\dot{V}_E$, en conditions ATPS ;
- . les échanges gazeux, $F_E O_2$ et $F_E CO_2$ étant lus instantanément grâce aux analyseurs rapides ;
- . la fréquence cardiaque.

Le sujet s'arrête à la fin d'un palier lorsqu'il arrive à épuisement c'est-à-dire qu'il ne peut plus poursuivre son effort malgré les encouragements vigoureux de son entourage. On note généralement à ce moment qu'il existe un plafonnement de la fréquence cardiaque, une augmentation brutale de la ventilation et une douleur au niveau des masses musculaires au travail, ces deux derniers

facteurs traduisant l'acidose sanguine due à la production d'acide lactique par le muscle épuisé.

100 μ l de sang sont prélevés au bout du doigt 2 minutes après l'arrêt de l'exercice pour le dosage de l'acide lactique.

- les calculs

La consommation d'oxygène est déterminée pour chaque palier à l'aide d'un programme pré établi sur calculatrice HEWLETT-PACKARD.

Les valeurs introduites sont :

- . le volume expiré et son temps de recueil,
- . $F_{E O_2}$ et $F_{E CO_2}$,
- . les facteurs de correction ATPS-BTPS et ATPS-STPD,
- . l'étalonnage du volume.

Les valeurs obtenues sont essentiellement :

- . la consommation d'oxygène,
- . le quotient respiratoire,
- . l'oxygène vrai.

A l'issue de ces calculs, on s'aperçoit que parfois la valeur maximale de $\dot{V}O_2$ peut être atteinte avant le dernier palier.

N.B. : Pour les footballeurs, la méthodologie est identique bien que l'ergomètre soit différent (tapis roulant). Le sujet court à 12 km.h⁻¹ sur le tapis. La pente est augmentée à chaque palier de 1 %. Bien que la durée des paliers reste la même (1 minute 30), l'épreuve de détermination de $\dot{V}O_2$ max dure en général plus longtemps car on obtient un plafonnement de $\dot{V}O_2$ max sur 2 ou 3 paliers.

c) mesure de la dette maximale d'oxygène

- le $\dot{V}O_2$ de repos

La deuxième séance des tests commence par la détermination de la consommation basale d'oxygène du sujet. Celui-ci est installé, habillé, dans une ambiance aussi calme que possible dans un fauteuil "relax" en position allongée. On recueille alors pendant 5 minutes

les gaz expirés qui sont analysés selon le principe décrit précédemment.

- 1'échauffement

L'exercice est pratiqué sur le même ergomètre que celui utilisé pour la détermination de $\dot{V}O_2$ max. La puissance est fixée à 50 % de la puissance maximale aérobie mesurée lors du premier test. Le montage est le même (masque, soupapes, électrodes).

L'échauffement dure 5 minutes et conduit à une fréquence cardiaque de 150 pulsations par minute à la fin de l'épreuve.

- 1'exercice supra maximal

Dès l'échauffement terminé, la puissance est brutalement augmentée jusqu'à 115 % de la puissance maximale aérobie (ou du dernier palier en cas de plafonnement) pour que l'exercice supra maximal épuise le sujet en 1 mn 30 à 2 mn 30.

Aux premiers signes de fatigue, on recueille pendant les quelques dernières secondes (20 secondes en moyenne), les gaz expirés dans un sac de Douglas pour pouvoir déterminer le $\dot{V}O_2$ atteint en fin d'exercice.

Le sujet s'arrête de pédaler brutalement dès qu'il sent qu'il ne peut plus maintenir cette puissance supra maximale.

Pendant toute la durée de l'exercice, la fréquence cardiaque est enregistrée pour pouvoir, à posteriori, contrôler que cette fréquence en fin d'exercice supra maximal avoisine bien la fréquence cardiaque maximale déterminée précédemment.

- la récupération

Dès l'arrêt de l'exercice, les gaz expirés sont recueillis en continu dans les sacs de Douglas.

11 sacs permettent le fractionnement des gaz expirés selon la méthode suivante :

- 3 sacs de 20 secondes,
- 2 sacs de 30 secondes,
- 3 sacs de 1 minute,
- 3 sacs de 5 minutes,

ce qui correspond à une durée totale de 20 minutes.

Pendant cette période de récupération, le sujet reste assis sur la bicyclette, le plus calme possible. 2 minutes après l'arrêt de l'exercice, 100 μ l de sang sont prélevés pour le dosage d'acide lactique.

- les calculs

La dette d'oxygène est déterminée comme étant la consommation totale d'O₂ de la période de récupération (20 minutes) moins la consommation basale d'O₂ pendant le même temps.

La consommation d'oxygène est mesurée dans chaque sac comme précédemment. Il faut ensuite intégrer la courbe (C) obtenue par la décroissance de $\dot{V}O_2$ en fonction du temps pour en obtenir la surface qui représente la dette d'oxygène totale. On retranche ensuite la consommation basale correspondante pour obtenir la dette réelle qui est exprimée en litres STPD (figure 9).

L'intégration de la courbe du temps 0 au temps 20 minutes est faite par la calculatrice HEWLETT-PACKARD.

4 - L'exploitation statistique des résultats

Les résultats des tests sont exposés dans le chapitre suivant.

Pour chaque groupe de résultats, les valeurs sont représentées par leur moyenne, accompagnées de l'écart-type ($m \pm \sigma_m$).

L'influence des différents facteurs (âge, sexe, activités physiques) sur l'évolution de la capacité physique a été étudiée en recherchant, par des tests t, si les différences entre les divers groupes d'enfants sont significatives, la probabilité p devant dans ce cas, être inférieure à 0,05.

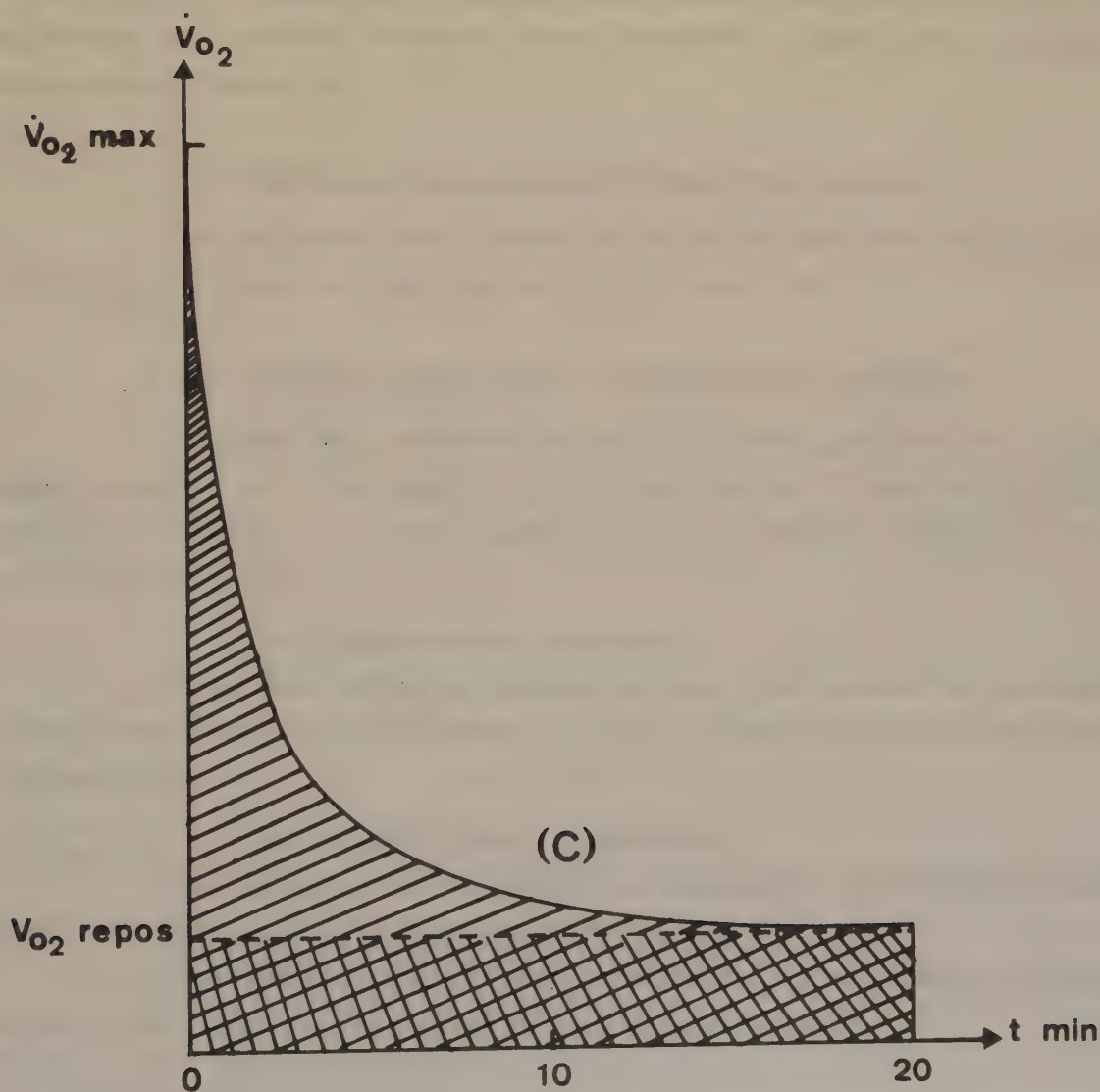
Enfin, l'évolution relative d'un test par rapport à un autre est exprimée sous forme de droites de corrélation lorsque le facteur de corrélation existant entre les deux tests est significatif ($p < 0.05$).

Tous ces calculs ont été effectués sur une calculatrice PROGRAMMA grâce à des programmes pré-établis sur cartes magnétiques.

FIGURE 9

Calcul de la dette maximale d'oxygène :

l'intégration de la courbe (C) de 0 à 20 minutes correspond à la dette totale d'oxygène pendant 20 minutes. On lui retranche alors la surface correspondant à la consommation d'oxygène de **repos** pendant le même temps pour obtenir la dette maximale réelle d'oxygène.



- IV - LES RESULTATS

Les enfants ayant répondu à différentes questions pour déterminer leur niveau habituel d'activité physique, les trois tests de détermination de la capacité physique ont été pratiqués en deux séances :

- mesure de $\dot{V}O_2$ max et de la puissance maximale anaérobie ;
- mesure de la dette maximale d'oxygène précédée elle-même par la mesure de la consommation d'oxygène au repos.

L'analyse des résultats vise à mettre en évidence le rôle éventuel de l'âge, du sexe, du niveau habituel d'activité physique et du type de sport pratiqué sur les trois composantes de la capacité physique de l'enfant (métabolisme anaérobie alactique, lactique et métabolisme aérobie).

1 - Niveau d'activité physique des enfants

Les enfants sont répartis en deux groupes inégaux selon qu'ils pratiquent ou non une activité sportive.

A - Enfants pratiquant une activité sportive

Ce sont des enfants de 10 à 15 ans, garçons et filles, appartenant à un club sportif. Ils ont par ailleurs une activité scolaire normale et vivent dans un environnement urbain (Lyon et sa proche banlieue).

a) gymnastique scolaire

Tous les enfants testés suivent les cours de gymnastique ce qui représente une moyenne de 2 h $\frac{1}{2}$ d'activité physique scolaire par semaine.

b) activité extra-scolaire

Les enfants de ce groupe pratiquent, en dehors du milieu scolaire, une activité sportive régulière.

Les enfants testés ont été choisis par leurs entraîneurs au sein du club sportif auquel ils appartiennent.

L'interrogatoire des enfants et des entraîneurs a permis de préciser les types différents d'entraînement selon le sport pratiqué :

. la natation

Les enfants pratiquent une heure et demie de natation par jour, cinq jours par semaine pendant toute l'année scolaire.

La séance d'entraînement consiste en l'apprentissage de la technique des différentes nages (brasse, papillon, dos et crawl) et en exercices visant à améliorer la capacité des processus oxydatifs de l'organisme. Les enfants parcourent ainsi, en une séance, une distance de 5 km faite par étapes progressivement croissantes, entrecoupées de périodes de repos. Ils contrôlent eux-mêmes, au pouls carotidien, la fréquence cardiaque atteinte à la fin de chaque exercice. Elle doit être de l'ordre de 180 à 200 pulsations par minute. De plus, une fois par semaine, 5 à 10 minutes sont consacrées à des exercices de gymnastique assouplissante et de musculation sans charge pour les plus âgés.

Les jeunes enfants ne sont pas spécialisés dans un type de nage. Cette spécialisation se fait progressivement selon les performances et l'aptitude de chacun.

. L'athlétisme

L'entraînement à cette discipline, qu'il s'agisse de course de vitesse ou de demi-fond, compte 2 à 3 séances de deux heures par semaine qui peuvent se décomposer en plusieurs parties.

Tout d'abord, une demi-heure est consacrée à l'échauffement obtenu grâce à une course lente ("footing") et des mouvements d'assouplissement. La fréquence cardiaque est, dans cette période, de l'ordre de 130 à 145 pulsations par minute. Puis, les enfants courent à une vitesse correspondant à 60-70 % de celle de leur meilleur temps pour la distance considérée, celle-ci étant variable selon la spécialité (sprint ou demi-fond) et l'âge. Généralement, la distance parcourue pour chaque course varie entre 200 et 800 m. A la fin de chaque période ainsi définie, la fréquence cardiaque est de l'ordre de 170 pulsations par minute. Puis, la vitesse est accrue afin de correspondre à 80 % du meilleur temps. Une période

de repos suit chaque parcours. Sa durée dépend de la distance parcourue précédemment. Ces exercices sont ainsi répétés pendant une heure et demie. La dernière demi-heure est consacrée à des exercices de sprint sur très courtes distances pour perfectionner le mouvement de la course et du départ.

Parfois, l'entraînement sous cette forme est remplacé par d'autres activités de même type : saut, course de haie, lancer de poids...

Comme en natation, les enfants ne se spécialisent qu'après plusieurs années de pratique selon leurs performances et les conseils de leur entraîneur.

. le football

Le nombre d'heures d'entraînement augmente avec les années de pratique sportive (3 heures pour les plus jeunes, jusqu'à 6 heures pour les plus âgés). L'entraînement comporte à la fois une période d'échauffement (footing) et surtout des exercices visant à acquérir la technique de ce sport. De plus les enfants disputent, au sein de leur équipe, un match tous les dimanches pendant l'année scolaire.

B - Ecoliers témoins

Les enfants témoins ont été choisis dans la classe CM1-CM2 (cours moyen 1ère et 2ème année) d'une école primaire communale des Monts du Lyonnais et représentent donc une tranche d'âge réduite à 10-11 ans.

Ils vivent tous dans un milieu rural.

a) gymnastique scolaire

Les enfants pratiquent en moyenne 3 séances d'une heure de gymnastique par semaine. De plus, ils vont régulièrement une heure par semaine à la piscine de la commune voisine.

b) activité extra-scolaire

Compte tenu de l'environnement, ces enfants ont une activité physique supérieure à celle d'enfants de même âge vivant dans un milieu urbain. En effet, appartenant essentiellement à des familles d'agriculteurs ou d'artisans, ils sont sollicités pour de

nombreux travaux dans le cadre de leur vie familiale. De plus, comme l'habitat est dispersé, la plupart ont à parcourir quotidiennement plusieurs kilomètres à pied pour se rendre à l'école dans une région où le relief est accidenté (Monts du Lyonnais).

2 - Evolution de la capacité physique au cours du développement chez les garçons et les filles pratiquant une activité sportive. Influence de l'âge et du sexe.

On ne tient compte dans ce paragraphe que des mesures pratiquées chez les enfants sportifs car la classe des enfants témoins est limitée à 10-11 ans.

A - La consommation maximale d'oxygène

Les résultats concernant la détermination de $\dot{V}O_2 \text{ max}$ sont rapportés dans le tableau I et les figures 10 et 11.

a) $\dot{V}O_2 \text{ max}$ en l STPD.min⁻¹ (figure 10)

. influence de l'âge

Chez les garçons, $\dot{V}O_2 \text{ max}$ augmente progressivement de 10 à 15 ans pour passer de 1,84 l STPD.min⁻¹ entre 10-11 ans à 3,35 l STPD.min⁻¹ entre 14-15 ans. Cette évolution est plus nette entre 12-13 ans et 14-15 ans ($p < 0.001$) qu'entre 10-11 et 12-13 ans ($0.01 > p > 0.001$).

Chez les filles, en revanche, si cette évolution existe entre 10-11 ans (1,57 l STPD.min⁻¹) et 12-13 ans (2,46 l STPD.min⁻¹) avec $p < 0.001$, elle se stabilise dans la tranche d'âge supérieure (2,48 l STPD.min⁻¹ à 14-15 ans) puisque la différence entre 12-13 et 14-15 ans n'est plus significative.

. influence du sexe

La différence entre garçons et filles d'une même tranche d'âge n'est significative ($0.05 > p > 0.02$) que pour les enfants les plus âgés (14-15 ans).

b) $\dot{V}O_2 \text{ max}$ en ml STPD.min⁻¹.kg⁻¹ (figure 11)

. influence de l'âge

Aussi bien pour les filles que pour les garçons, la

SEXE	Age	n	$\dot{V}O_2$ MAX		F.C. Max min ⁻¹	A.L. mg.100 ml ⁻¹
			ℓ STPD.min ⁻¹	ml STPD.min ⁻¹ .kg ⁻¹		
GARCONS	10-11	12	1.84 ± 0.07	54.4 ± 2.4	202 ± 3	65 ± 5
	12-13	15	2.22 ± 0.07	56.8 ± 1.4	203 ± 2	71 ± 5
	14-15	19	3.35 ± 0.18	59.4 ± 1.2	200 ± 1	72 ± 5
FILLES	10-11	8	1.57 ± 0.10	48.9 ± 1.5	200 ± 4	69 ± 3
	12-13	3	2.46 ± 0.13	52.8 ± 3.6	193 ± 5	51 ± 12
	14-15	4	2.48 ± 0.18	52.7 ± 4.0	200 ± 2	73 ± 21

TABLEAU I

Consommation maximale d'oxygène ($\dot{V}O_2$ Max) en ℓ STPD.min⁻¹ et en ml STPD.min⁻¹.kg⁻¹, fréquence cardiaque maximale (F.C.) et taux sanguin d'acide lactique (A.L.) après l'exercice maximal chez les garçons et filles de 10 à 15 ans pratiquant régulièrement une activité sportive.

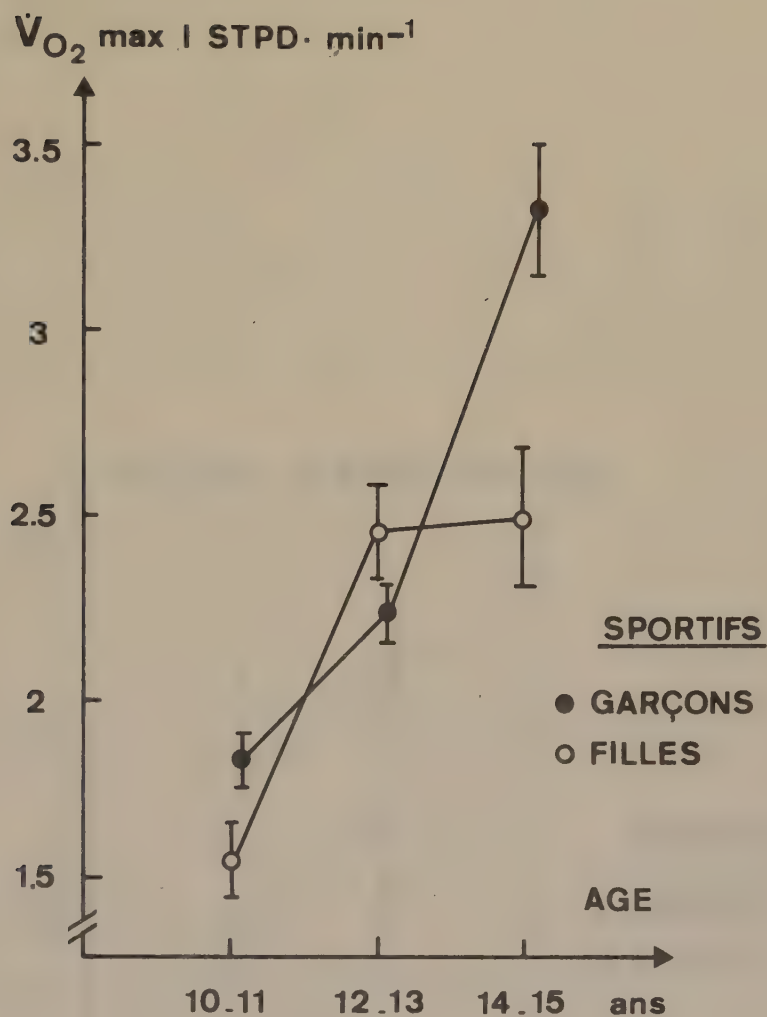
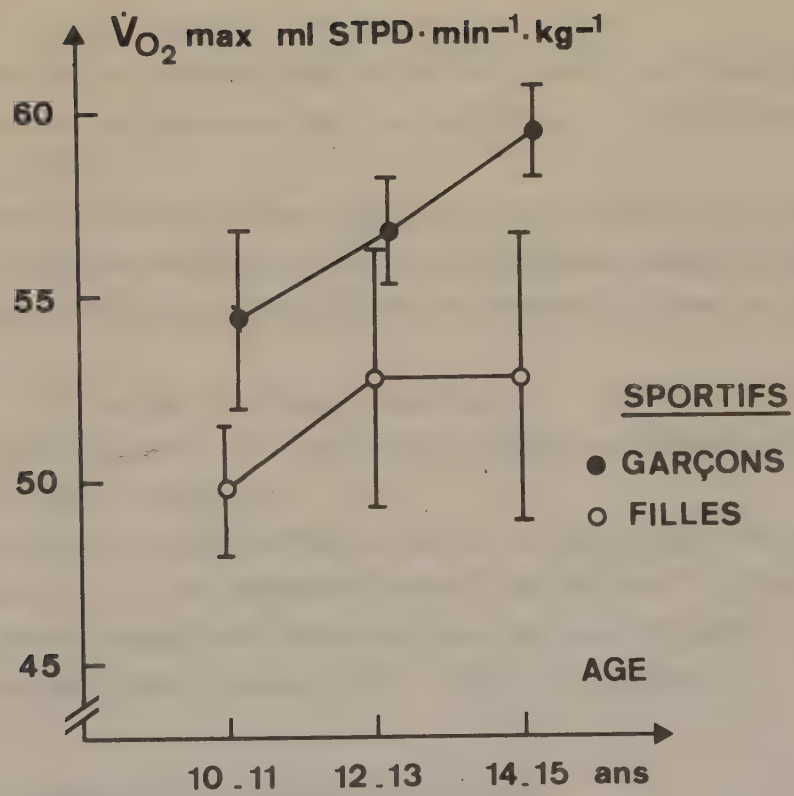


FIGURE 10 : Evolution avec l'âge de la consommation maximale d'oxygène en $\text{l STPD} \cdot \text{min}^{-1}$ chez les enfants (garçons et filles) pratiquant une activité sportive.

FIGURE 11 : Evolution avec l'âge de la consommation maximale d'oxygène rapportée à l'unité de poids corporel (ml STPD.min⁻¹.kg⁻¹) chez les enfants (garçons et filles) pratiquant une activité sportive.



valeur de $\dot{V}O_2$ max rapportée à l'unité de poids corporel est stable pendant toute la période comprise entre 10 et 15 ans sans différence significative entre les tranches d'âge.

Les valeurs les plus élevées sont de 67,9 ml STPD.min⁻¹.kg⁻¹ chez un footballeur de 13 ans et de 60 ml STPD.min⁻¹.kg⁻¹ chez une athlète (demi-fond) de 14 ans.,

. influence du sexe

Comme pour $\dot{V}O_2$ max en l STPD.min⁻¹, les valeurs sont identiques chez les garçons et filles jusqu'à 12-13 ans mais à 14-15 ans s'amorce une différence à la limite de la signification ($p = 0,05$) (59,4 ml STPD.min⁻¹.kg⁻¹ chez les garçons de 14-15 ans et 52,7 ml STPD.min⁻¹.kg⁻¹ chez les filles de même âge).

c) fréquence cardiaque maximale

Lors de la détermination de $\dot{V}O_2$ max, les fréquences cardiaques maximales atteintes sont en moyenne de 200 pulsations par minute (172 - 226).

On ne retient aucune influence de l'âge ni du sexe, cette fréquence cardiaque maximale restant remarquablement stable de 10 à 15 ans sans différence significative entre filles et garçons.

d) acide lactique sanguin

Le prélèvement de sang capillaire est effectué 2 minutes après l'arrêt de l'exercice.

Le taux d'acide lactique dans le sang lors de la détermination de $\dot{V}O_2$ max est, en moyenne, de 67 mg.100 ml⁻¹ (7,4 mMoles.l⁻¹) soit des valeurs comprises entre 42 et 122 mg.100 ml⁻¹. Elles ne varient pas significativement avec l'âge et le sexe.

B - puissance maximale anaérobie

Les résultats concernant ce test sont représentés dans le tableau II et la figure 12.

a) influence de l'âge

Chez les garçons, les valeurs de la puissance maximale anaérobie représentée par la composante verticale de la vitesse

SEXE	AGE	n	Vv $\text{kgm.kg}^{-1}.\text{sec}^{-1}$
GARCONS	10-11	9	1.24 ± 0.07
	12-13	11	1.41 ± 0.04
	14-15	6	1.47 ± 0.09
FILLES	10-11	7	1.23 ± 0.04
	12-13	3	1.32 ± 0.03
	14-15	4	1.37 ± 0.09

TABLEAU II

Puissance maximale anaérobie (Vv) en $\text{kgm.kg}^{-1}.\text{sec}^{-1}$
chez les enfants de 10 à 15 ans pratiquant régulièrement
une activité sportive.

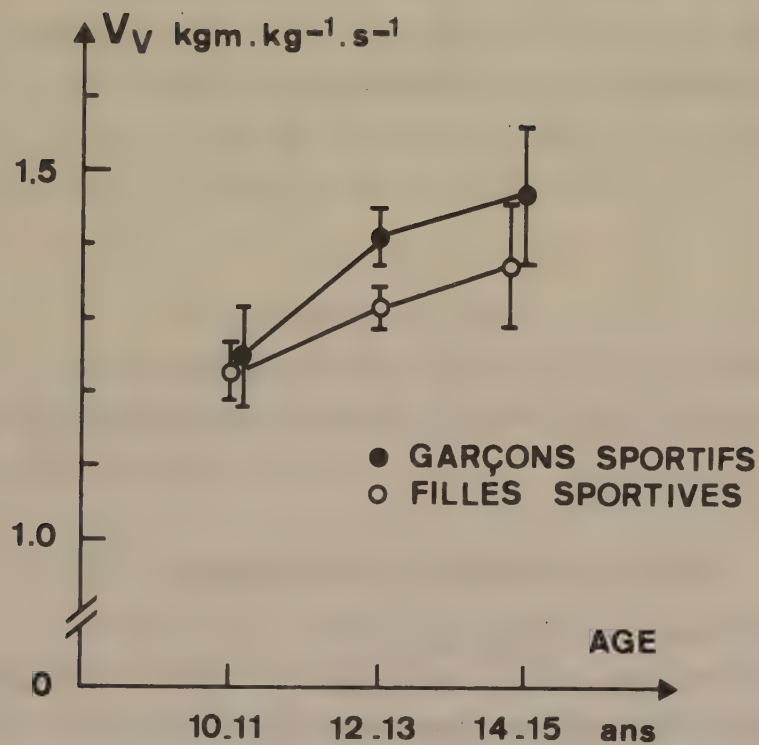


FIGURE 12 : Evolution avec l'âge de la puissance maximale anaérobie (V_v) en $\text{kgm.kg}^{-1}.\text{sec}^{-1}$ chez les enfants (garçons et filles) pratiquant une activité sportive.

maximale atteinte ($V_V \text{ max}$) augmentent avec l'âge pour passer de $1,22 \text{ kgm.kg}^{-1}.\text{sec}^{-1}$ à 10-11 ans à $1,47 \text{ kgm.kg}^{-1}.\text{sec}^{-1}$ à 14-15 ans. La différence entre les tranches d'âge est significative entre 10-11 ans et 12-13 ans ($0,001 < p < 0,01$).

Entre 12-13 ans et 14-15 ans, les valeurs restent stables ($1,41 \text{ kgm.kg}^{-1}.\text{sec}^{-1}$ à 12-13 ans et $1,47 \text{ kgm.kg}^{-1}.\text{sec}^{-1}$ à 14-15 ans). La valeur la plus élevée a été trouvée chez un athlète de course de vitesse de 15 ans ($1,86 \text{ kgm.kg}^{-1}.\text{sec}^{-1}$).

La même évolution s'observe chez les filles : $1,23 \text{ kgm.kg}^{-1}.\text{sec}^{-1}$ à 10-11 ans, $1,37 \text{ kgm.kg}^{-1}.\text{sec}^{-1}$ à 12-13 ans et $1,49 \text{ kgm.kg}^{-1}.\text{sec}^{-1}$ à 14-15 ans. La différence n'est significative qu'entre les classes d'âge 10-11 et 12-13 ans ($0,01 < p < 0,02$). Le meilleur résultat pour les filles est de $1,52 \text{ kgm.kg}^{-1}.\text{sec}^{-1}$ chez une nageuse de 12 ans.

b) influence du sexe

La comparaison des résultats du test décrit par MARGARIA ne montre aucune différence significative entre garçons et filles d'une même tranche d'âge.

C - Consommation d'oxygène au repos

L'évolution de $\dot{V}O_2$ au repos au cours de l'enfance et de l'adolescence chez les garçons et les filles est tout à fait comparable à celle de la consommation maximale d'oxygène, aussi bien pour son expression en valeur absolue (ml STPD.min^{-1}) qu'en valeur relative par rapport au poids corporel ($\text{ml STPD.min}^{-1}.\text{kg}^{-1}$).

Les résultats des mesures effectuées au repos sont relevés dans le tableau III et les figures 13 et 14.

a) $\dot{V}O_2$ de repos en ml STPD.min^{-1} (figure 13)

Sa valeur augmente avec l'âge chez les garçons ($177 \text{ ml STPD.min}^{-1}$ à 10-11 ans et $287 \text{ ml STPD.min}^{-1}$ à 14-15 ans). La différence est hautement significative entre les trois tranches d'âge ($p < 0,001$).

Chez les filles, cette évolution n'est nette qu'entre 10-11 ans et 12-13 ans ($0,01 > p > 0,001$), la valeur de $\dot{V}O_2$ se stabilisant après la poussée de croissance pubertaire.

SEXE	AGE	n	$\dot{V}O_2$ repos		$\dot{V}_E$ ℓ BTPS.min ⁻¹	Q.R.
			ml STPD.min ⁻¹	ml STPD.min ⁻¹ .kg ⁻¹		
GARCONS	10-11	21	177 ± 7	5.3 ± 0.2	6.8 ± 0.3	0.82±0.01
	12-13	16	218 ± 9	5.5 ± 0.2	7.9 ± 0.3	0.82±0.02
	14-15	19	287 ± 14	5.1 ± 0.2	8.9 ± 0.5	0.78±0.01
FILLES	10-11	13	167 ± 9	5.6 ± 0.2	6.8 ± 0.4	0.82±0.01
	12-13	4	209 ± 34	4.3 ± 0.6	7.5 ± 1.6	0.84±0.05
	14-15	4	235 ± 10	5.0 ± 0.2	8.0 ± 0.8	0.83±0.01

TABLEAU III

Résultats des mesures pratiquées chez les enfants de 10 à 15 ans
au repos :

Consommation d'oxygène ($\dot{V}O_2$ repos) en ml STPD.min⁻¹ et
en ml STPD.min⁻¹.kg⁻¹
Volume expiré ($\dot{V}_E$) en ℓ BTPS.min⁻¹
Quotient respiratoire (Q.R.)

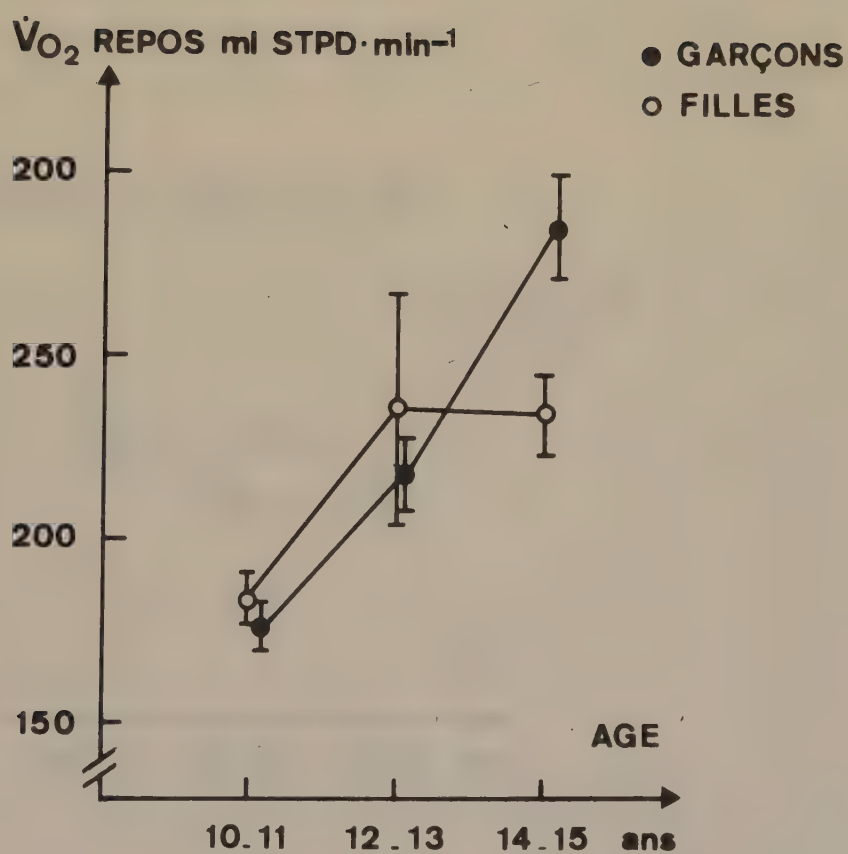


FIGURE 13 : Evolution de la consommation d'oxygène au repos (ml STPD.min⁻¹) chez les enfants de 10 à 15 ans.

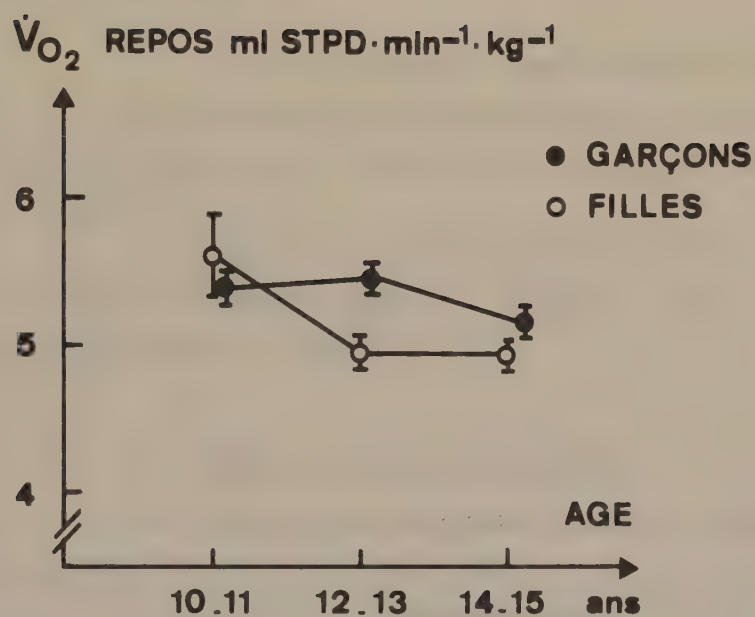


FIGURE 14 : Evolution de la consommation d'oxygène au repos rapportée à l'unité de poids corporel (ml STPD.min⁻¹.kg⁻¹) chez les enfants de 10 à 15 ans.

Il n'existe pas de différence significative entre les sexes dans une même tranche d'âge.

b) $\dot{V}O_2$ de repos en ml STPD.min⁻¹.kg⁻¹ (figure 14)

$\dot{V}O_2$ de repos reste très stable autour de la valeur moyenne de 5,1 ml STPD.min⁻¹.kg⁻¹ aussi bien chez les filles que chez les garçons pendant toute la période comprise entre 10 et 15 ans.

c) la ventilation au repos

Le volume expiré est en moyenne pour tous les enfants, garçons et filles, de l'ordre de 7,6 l BTPS.min⁻¹.

On ne retient pas de variation importante de $\dot{V}_E$ avec l'âge ni avec le sexe.

d) le quotient respiratoire (Q.R) au repos

Les valeurs du quotient respiratoire pendant la mesure de $\dot{V}O_2$ de repos sont comprises entre 0,78 et 0,84 ce qui représente une moyenne de 0,82.

Le quotient respiratoire est stable au cours de la croissance (10 à 15 ans) chez les garçons aussi bien que chez les filles sans influence du sexe.

D - Dette maximale d'oxygène

Les résultats concernant cette mesure sont regroupés dans le tableau IV et la figure 15.

Comme pour la détermination de $\dot{V}O_2$ max, ces résultats expriment la dette maximale d'oxygène en valeur absolue mesurée pendant 20 minutes (1 STPD) et en valeur relative par rapport au poids corporel (ml STPD.kg⁻¹). De même sont notés la fréquence cardiaque maximale atteinte à l'épuisement et le taux d'acide lactique sanguin deux minutes après l'arrêt de l'exercice supra maximal.

a) dette maximale en 1 STPD (figure 15)

L'évolution de la dette maximale d'oxygène en 1 STPD est identique à celle de $\dot{V}O_2$ max (1 STPD.min⁻¹).

. influence de l'âge

L'influence de l'âge est différente chez les garçons et

SEXE	AGE	n	Dette maximale		F.C.min ⁻¹	A.L. mg.100 ml ⁻¹
			ℓ STPD	ml STPD.kg ⁻¹		
GARCONS	10-11	12	2.21 ± 0.20	63.9 ± 4.2	196 ± 2	84 ± 6
	12-13	15	2.80 ± 0.16	71.1 ± 3.3	196 ± 2	87 ± 5
	14-15	18	5.06 ± 0.36	90.3 ± 4.6	194 ± 2	92 ± 6
FILLES	10-11	8	1.91 ± 0.20	62.2 ± 5.0	196 ± 4	77 ± 15
	12-13	3	3.22 ± 0.60	73.1 ± 21.7	183 ± 5	80 ± 4
	14-15	4	3.02 ± 0.22	64.7 ± 8.0	193 ± 3	89 ± 18

TABLEAU IV

Dette maximale d'oxygène mesurée pendant 20 minutes (en ℓ STPD et en ml STPD.kg⁻¹), fréquence cardiaque maximale (F.C.) et taux sanguin d'acide lactique (A.L.) après l'exercice supra-maximal, chez les garçons et filles de 10 à 15 ans pratiquant régulièrement une activité sportive.

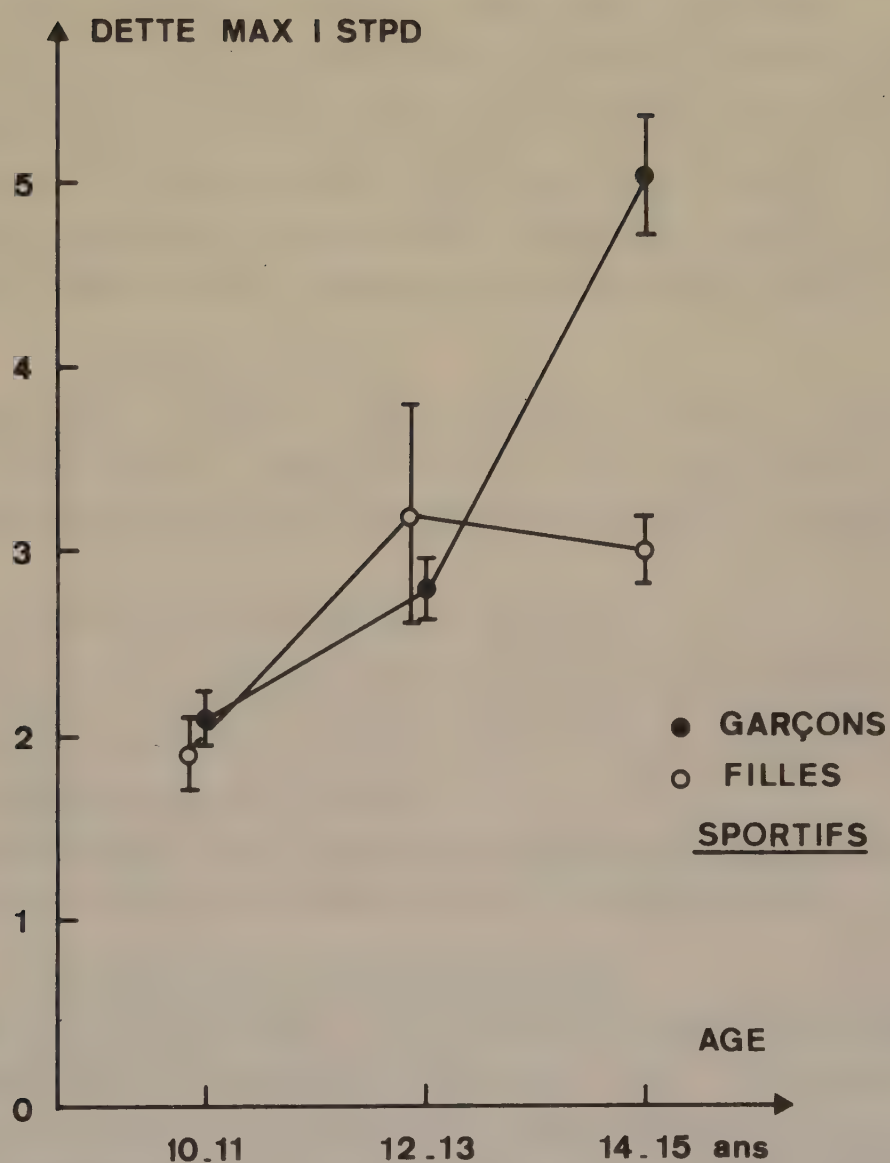


FIGURE 15 : Evolution avec l'âge de la dette maximale d'oxygène (1 STPD) mesurée pendant 20 minutes chez les enfants (garçons et filles) pratiquant une activité sportive.

les filles.

Chez les premiers, la dette maximale augmente pendant toute la période comprise entre 10 et 15 ans (2,21 l STPD à 10-11 ans, 2,80 à 12-13 ans et 5,07 à 14-15 ans). Cette augmentation déjà significative entre 10-11 ans et 12-13 ans ($0,02 < p < 0,05$) est encore plus nette entre 12-13 ans et 14-15 ans ($p < 0,001$).

Chez les filles, au contraire, la dette maximale évolue de façon significative ($0,001 < p < 0,01$) dans la période prépubertaire (1,91 l STPD à 10-11 ans et 3,22 l STPD à 12-13 ans) mais ne progresse plus dans la tranche d'âge supérieure (3,01 l STPD à 14-15 ans).

Les valeurs les plus élevées concernent un footballeur de 15 ans (8,53 l STPD) et une nageuse de 12 ans (4,38 l STPD).

. influence du sexe

Comme cela a déjà été noté à propos de $\dot{V}O_2$ max, aucune différence n'est apparue pouvant être reliée au sexe dans une même tranche d'âge excepté pour les enfants de 14-15 ans ($0,01 < p < 0,02$).

b) dette maximale en ml STPD.kg⁻¹

Exprimée sous cette forme, la dette maximale augmente significativement pour les tranches d'âge 12-13 et 14-15 ans chez les garçons ($p < 0,001$) tandis qu'elle reste stable pendant toute la période étudiée chez les filles.

Il en résulte une différence significative entre garçons et filles pour la période de 14 à 15 ans ($0,01 > p > 0,001$).

c) fréquence cardiaque maximale

Les valeurs atteintes à la fin de l'exercice supra maximal sont en moyenne de 193 pulsations par minute (176 - 214). Pour les filles de 12 à 13 ans, les valeurs sont plus basses (183 ± 5) mais le nombre d'enfants concernés est faible ($n = 3$) ce qui enlève beaucoup de sa signification à ce résultat.

d) acide lactique sanguin

Le taux moyen d'acide lactique dans le sang capillaire prélevé 2 minutes après l'arrêt de l'exercice est de 85 mg.100 ml⁻¹ (9,4 mMoles.l⁻¹) soit des valeurs extrêmes de 55 et 143 mg.100 ml⁻¹.

Les résultats ne montrent pas d'évolution significative de 10 à 15 ans ni de différence selon le sexe.

En somme :

Exprimés en valeur absolue, $\dot{V}O_2$ max, $\dot{V}O_2$ de repos et dette maximale d'oxygène évoluent parallèlement au cours du développement de l'enfant :

- chez le garçon, cette évolution se fait pendant toute la période comprise entre 10 et 15 ans, alors que chez la fille elle se stabilise après 13 ans, âge auquel se termine la poussée de croissance pubertaire. C'est pour-quoi, alors qu'il n'existe pas de différence entre les sexes chez les enfants jusqu'à 13 ans, cette différence est significative dans tous les cas pour la tranche d'âge supérieure (14-15 ans),

- exprimés en valeur relative par rapport à l'unité de poids corporel, les résultats montrent que l'évolution est différente pour $\dot{V}O_2$ max, $\dot{V}O_2$ de repos et dette maximale d'oxygène. En effet, alors que $\dot{V}O_2$ max et $\dot{V}O_2$ de repos restent stables pendant toute la période comprise entre 10 et 15 ans sans différence significative entre les sexes, la dette maximale d'oxygène augmente chez le garçon uniquement entre 12-13 et 14-15 ans,

- Enfin, l'évolution de la puissance maximale anaérobie est surtout nette entre 10-11 ans et 12-13 ans alors qu'elle se stabilise dans la tranche d'âge supérieure. Les valeurs de ce test ne sont pas significativement différentes selon le sexe.

3 - Influence du niveau d'activité physique sur la capacité physique des enfants de 10 et 11 ans.

Pour mettre en évidence, éventuellement, l'influence du niveau d'activité physique sur les trois composantes de la capacité physique, on a comparé les résultats obtenus pour les trois tests chez des enfants de 10 à 11 ans pratiquant ou non régulièrement une activité sportive (Tableau V - Figure 16).

	GARCONS				FILLES			
	n	A	n	B	n	A	n	B
V_v $\text{kgm.kg}^{-1}.\text{sec}^{-1}$	9	1.19 ± 0.03	9	1.24 ± 0.07	5	1.01 ± 0.11	7	1.23 ± 0.04
$\dot{V}O_2 \text{ Max}$ $\text{ml STPD.min}^{-1}.$ kg^{-1}	9	50.9 ± 2.3	12	54.4 ± 2.4	5	42.9 ± 3.0	8	48.9 ± 1.5
Dette max $\ell \text{ STPD}$	9	1.90 ± 0.13	12	2.21 ± 0.20	5	1.69 ± 0.17	8	1.91 ± 0.20

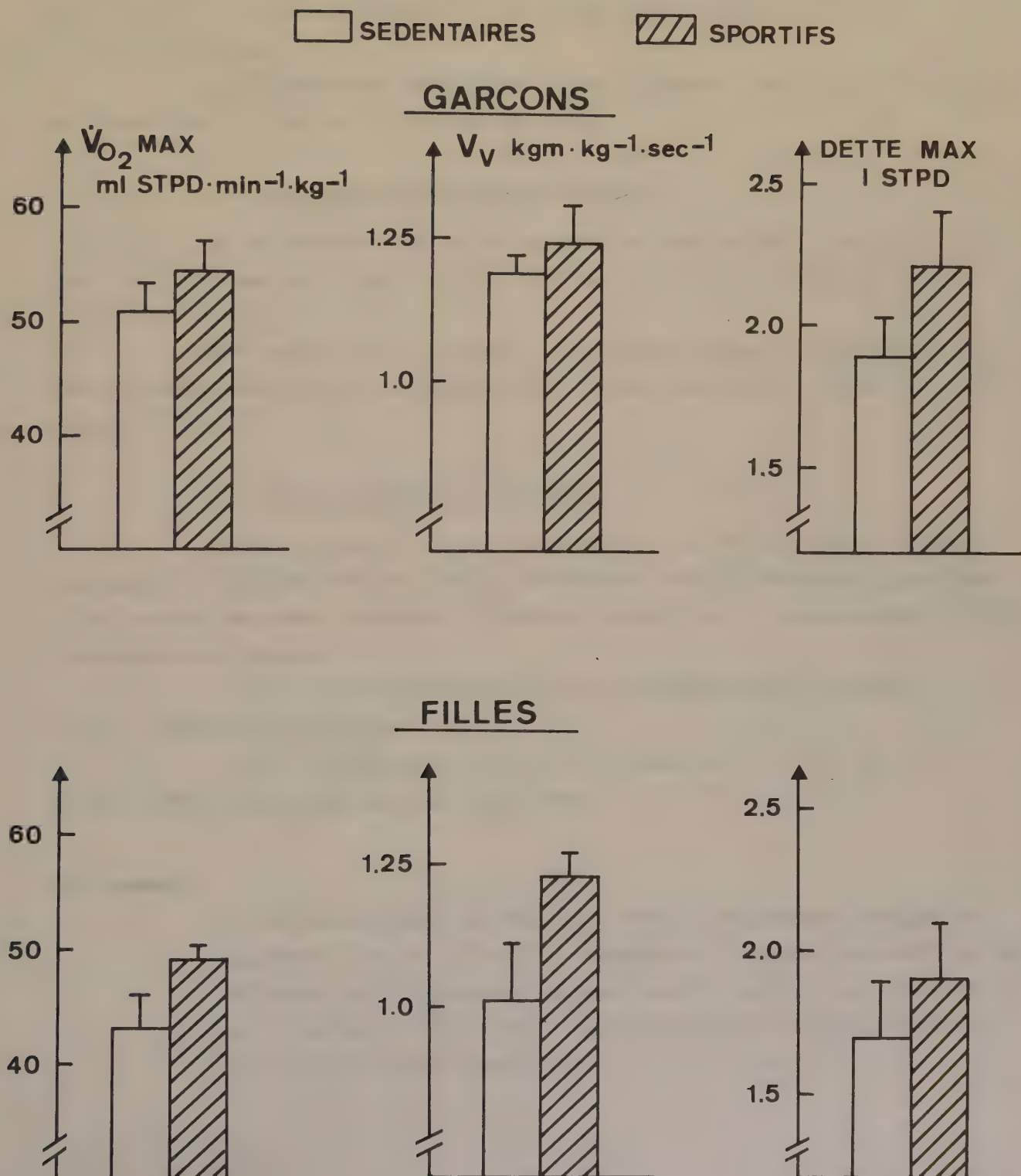
TABLEAU V

Comparaison des résultats obtenus lors des trois tests
chez les enfants de 10 et 11 ans répartis en deux groupes
et selon leur niveau d'activité sportive :

A = écoliers témoins "sédentaires"

B = enfants pratiquant régulièrement une activité sportive

FIGURE 16 : Comparaison des trois tests de détermination de la capacité physique chez les garçons et filles de 10-11 ans selon qu'ils pratiquent ou non une activité sportive régulière.



A - Consommation maximale d'oxygène

La consommation maximale d'oxygène chez les écoliers témoins est de 50,9 ml STPD.min⁻¹.kg⁻¹ (1,61 l STPD.min⁻¹) pour les garçons et de 42,9 ml STPD.min⁻¹.kg⁻¹ (1,23 l STPD.min⁻¹) pour les filles.

Pour les enfants sportifs de même âge, on rappelle que la consommation maximale d'oxygène était respectivement de 54,4 ml STPD.min⁻¹.kg⁻¹ (1,84 l STPD.min⁻¹) et de 48,9 ml STPD.min⁻¹.kg⁻¹ (1,57 l STPD.min⁻¹).

La différence entre les deux groupes n'est significative ni chez les filles ni chez les garçons.

B - Puissance maximale anaérobie

La puissance maximale anaérobie des enfants non sportifs est de 1,19 kgm.kg⁻¹.sec⁻¹ chez les garçons et 1,01 kgm.kg⁻¹.sec⁻¹ chez les filles.

Ces valeurs ne sont pas significativement différentes de celles mesurées chez les garçons et filles sportifs (1,24 et 1,23 kgm.kg⁻¹.sec⁻¹).

C - Dette maximale d'oxygène

Comme les deux tests précédents, la mesure de la dette maximale d'oxygène ne met pas en évidence une différence significative entre les deux groupes d'enfants selon qu'ils pratiquent ou non une activité sportive :

- 1,90 l STPD pour les garçons témoins au lieu de 2,21 l STPD pour les sportifs ;

- 1,69 l STPD pour les filles témoins au lieu de 1,91 l STPD pour les filles sportives.

En somme :

La détermination de $\dot{V}O_2$ max, de la puissance maximale anaérobie et de la dette maximale d'oxygène ne met pas en évidence de différence significative entre les deux groupes d'enfants de 10 à 11 ans selon qu'ils pratiquent ou non une activité sportive.

4 - Influence du type d'activité sportive sur l'évolution de la capacité physique.

Les enfants se répartissent en trois groupes selon le sport qu'ils pratiquent. Seuls les résultats concernant les garçons sportifs sont étudiés car le nombre de filles dans chaque sport est trop faible pour une interprétation statistique satisfaisante.

Le tableau VI et les figures 17, 18 et 19 résument les valeurs de ces tests chez les garçons en distinguant les trois sports pratiqués.

A - Mesure de $\dot{V}O_2$ max (figure 17)

La comparaison des résultats de $\dot{V}O_2$ max chez les garçons sportifs de 10 à 15 ans selon l'activité sportive qu'ils pratiquent régulièrement ne met en évidence qu'une différence significative ($p < 0,001$) dans la tranche d'âge 14-15 ans entre les athlètes ($54,1 \text{ ml.STPD.min}^{-1}.\text{kg}^{-1}$) et les footballeurs ($62,5 \text{ ml STPD.min}^{-1}.\text{Kg}^{-1}$)

B - Mesure de la dette maximale d'oxygène (figure 18)

La dette maximale d'oxygène évolue chez les garçons de 10 à 15 ans indépendamment du sport pratiqué puisqu'il n'existe aucune différence significative entre les divers groupes.

C - Mesure de la puissance maximale anaérobie (figure 19)

Chez les enfants de 10-11 ans, on ne note aucune différence entre les sports. En revanche, les footballeurs de 12 et 13 ans ont, en moyenne, des résultats supérieurs à ceux des athlètes de même âge ($0,02 < p < 0,05$). De même, les athlètes de 14-15 ans ont une vitesse maximale plus grande que les nageurs de même âge ($0,02 < p < 0,05$). Les footballeurs de cette tranche d'âge n'ont pu être testés.

En somme :

Le type d'activité sportive pratiquée n'a qu'une influence très limitée sur l'évolution de la capacité physique chez l'enfant au cours de son développement.

On ne retient comme significatives que les valeurs de la consommation maximale d'oxygène plus élevées chez le foot-

GARCONS	n	10-11 ans	n	12-13 ans	n	14-15 ans
Athlétisme	3	45.9 ± 5.1	4	53.9 ± 1.1	6	54.1 ± 2.0
Natation	7	56.0 ± 2.5	3	53.8 ± 3.8	2	58.6 ± 1.8
Foot ball	2	61.7 ± 1.7	8	59.4 ± 1.8	11	62.5 ± 1.0
$\dot{V}_{O_2}$ Max (ml STPD.min ⁻¹ .kg ⁻¹)						
Athlétisme	2	1.10 ± 0.14	2	1.33 ± 0.03	3	1.58 ± 0.16
Natation	5	1.25 ± 0.11	2	1.29 ± 0.20	2	1.37 ± 0.04
Foot ball	2	1.37 ± 0.15	7	1.47 ± 0.02	1	1.36
Puissance maximale anaérobie (kgm.kg ⁻¹ .sec ⁻¹)						
Athlétisme	3	2.45 ± 0.55	4	2.75 ± 0.17	6	4.08 ± 0.66
Natation	7	2.27 ± 0.25	3	3.15 ± 0.33	2	5.25 ± 0.18
Foot ball	2	1.61 ± 0.09	8	2.69 ± 0.26	10	5.61 ± 0.46

Dette maximale d'oxygène (ℓ STPD)

TABLEAU VI

Comparaison des trois tests chez les garçons sportifs selon le type d'activité sportive pratiquée

FIGURE 17 : Comparaison de la consommation maximale d'oxygène chez les garçons de 10 à 15 ans selon le type d'activité sportive pratiquée.

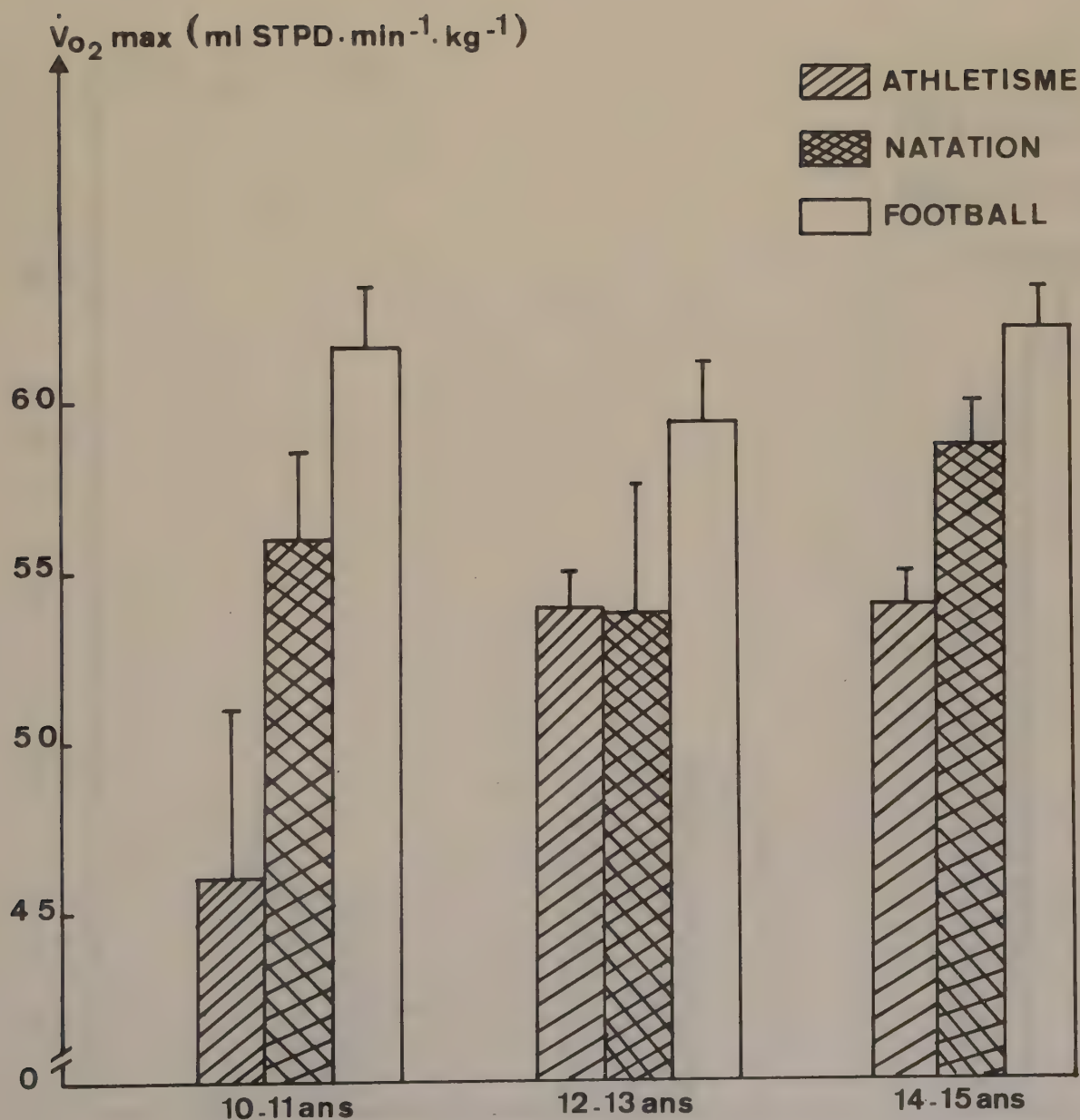


FIGURE 18 : Comparaison de la dette maximale d'oxygène chez les garçons de 10 à 15 ans selon le type d'activité sportive pratiquée.

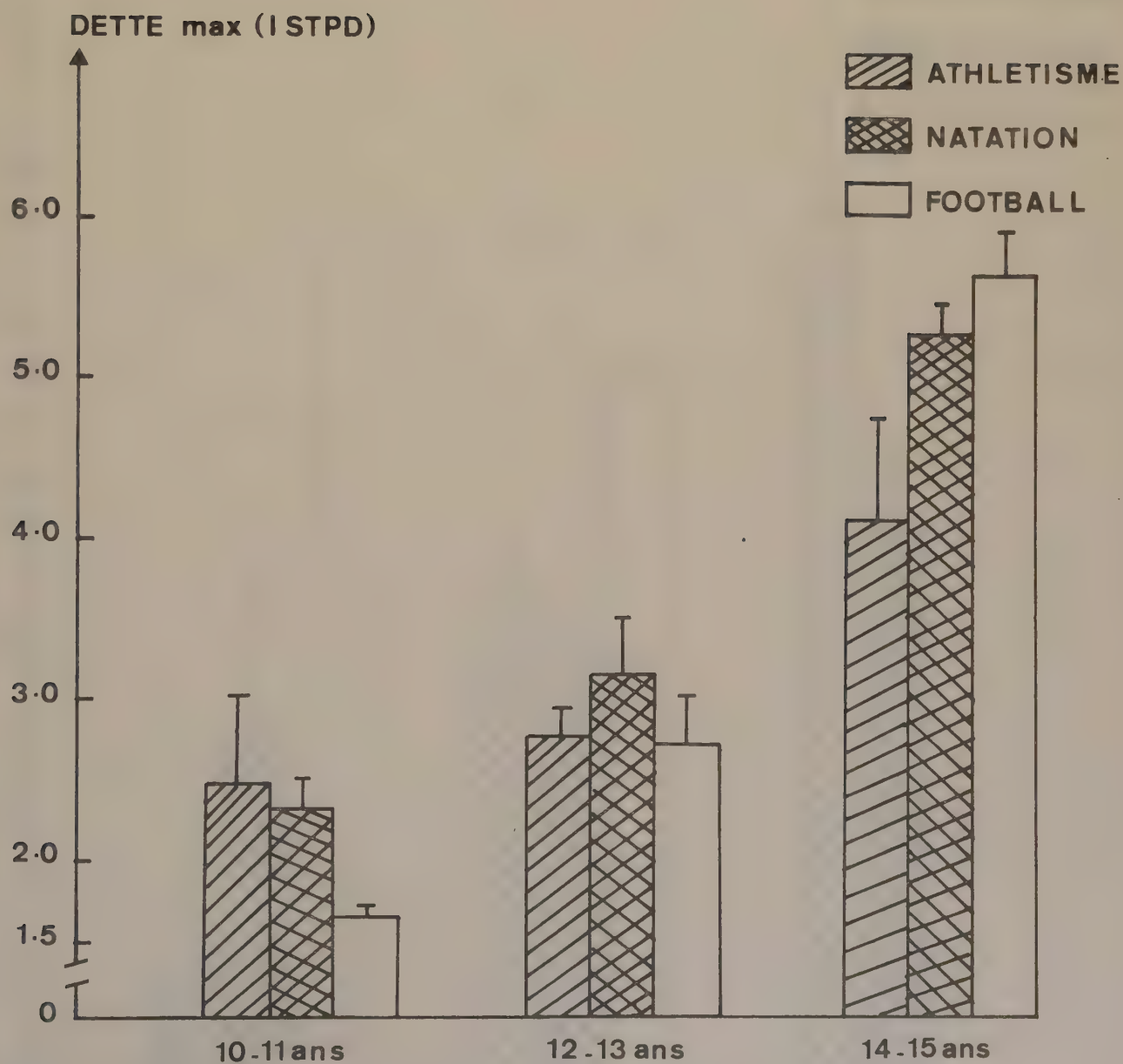
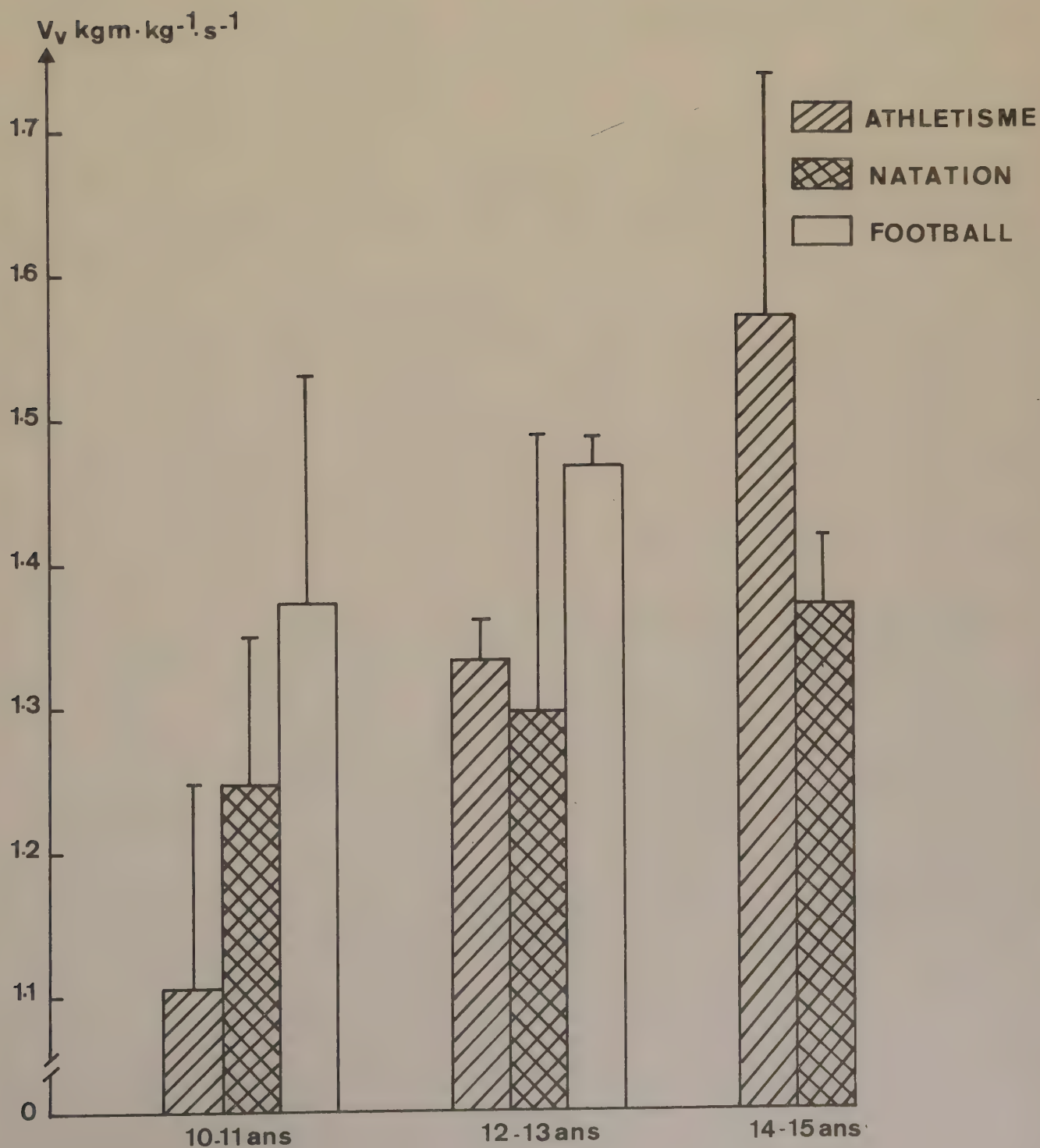


FIGURE 19 : Comparaison de la puissance maximale anaérobie chez les garçons de 10 à 15 ans selon le type d'activité sportive pratiquée.



balleur de 14-15 ans que chez l'athlète de même âge et celles de la puissance maximale anaérobie supérieures à 12-13 ans chez le footballeur par rapport à l'athlète alors qu'elles sont supérieures à 14-15 ans chez l'athlète par rapport aux nageurs. Les footballeurs de même âge n'ont pu être testés.

- V - DISCUSSION

Avant de pouvoir tirer des conclusions à partir des résultats qui viennent d'être exposés, il importe de discuter un certain nombre de points : tout d'abord, la critique de l'échantillon des sujets dans chaque groupe d'enfants selon le sport ou l'activité pratiqué ; ensuite, quelle est la valeur méthodologique des tests tels qu'ils ont été pratiqués ; quelle est d'autre part l'aptitude du groupe d'enfants français étudiés comparativement à celle des enfants étrangers ayant fait l'objet de publications antérieures ; dans quelle mesure le type de sport pratiqué peut-il modifier l'évolution de la capacité physique entre 10 et 15 ans.

Enfin, ces résultats, dans la mesure où ils diffèrent nettement de ceux de l'adulte doivent être discutés sous l'angle de l'évolution, au cours de la croissance, du rôle respectif des différents métabolismes aérobie et anaérobies pendant l'exercice musculaire.

1 - Le choix des sujets

Les sujets qui ont subi les tests d'aptitude physique ont été répartis en deux groupes :

- un groupe d'enfants pratiquant régulièrement une activité sportive ;
- un groupe témoin d'enfants sédentaires représenté par de jeunes enfants d'une école communale des Monts du Lyonnais.

Or, d'une part le groupe témoin possède un effectif réduit (10-11 ans) et d'autre part, l'analyse des résultats met en évidence que ces enfants ne sont pas représentatifs d'une population témoin. En effet, si on considère les résultats trouvés lors de la détermination de $\dot{V}O_2$ max (test le plus employé pour apprécier l'aptitude physique) et si on les compare à l'étude de BOTTIN (Thèse, LYON 1977) portant sur une population d'écoliers lyonnais âgés de 11 à 16 ans et ne pratiquant aucune activité sportive en dehors du milieu scolaire, il apparaît que nos résultats sont significativement supérieurs :

45 $\text{ml} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ pour les garçons : 51 $\text{ml} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ au lieu de

38 $\text{ml} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ pour les filles : 43 $\text{ml} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ au lieu de

Cette différence peut s'expliquer par le mode de vie particulier de nos enfants témoins qui habitent dans un milieu rural et qui sont, de ce fait, beaucoup plus sollicités par leur entourage pour effectuer des travaux importants. Leur activité physique extra scolaire est donc bien supérieure à celle d'enfants de même âge vivant dans un milieu urbain.

Pour ce qui est des enfants pratiquant régulièrement une activité sportive extra scolaire, ils ont été répartis en 3 sous-groupes selon le type d'activité sportive pratiquée (nageurs, athlètes, footballeurs). Le nombre insuffisant de filles testées n'a permis une étude comparative des différents métabolismes en fonction du sport pratiqué que chez les garçons de 10 à 15 ans.

Il faut noter que les jeunes footballeurs et nageurs pratiquent, en plus d'un entraînement sérieux visant à améliorer leur consommation maximale d'oxygène, de nombreuses compétitions au sein de leur équipe. Les footballeurs qui ont été testés au laboratoire ont déjà été sélectionnés par leur entraîneur parmi les meilleurs du club, pour appartenir, chacun dans sa catégorie d'âge, à une équipe de football représentant le club en question dans les rencontres sportives.

En revanche, les jeunes enfants qui appartiennent au club d'athlétisme ont été inscrits par leurs parents. Pour la plupart, essentiellement chez les plus jeunes, ils pratiquent ce sport sans idée de compétition et l'entraînement est donc pour cette raison plus modéré.

2 - Critique des méthodes utilisées pour la détermination de la capacité physique chez l'enfant.

La détermination de la consommation maximale d'oxygène et de la puissance maximale anaérobie n'a pas posé de problème tant du point de vue du principe même des méthodes que de la technique de mesure. En revanche, la technique de mesure de la dette maximale d'oxygène chez l'enfant a nécessité différentes adaptations par rapport à celle généralement utilisée chez l'adulte.

- la détermination de $\dot{V}O_2$ max

La méthode utilisée est celle habituellement employée au laboratoire. Elle consiste en un exercice triangulaire composé de plusieurs paliers (3 à 4 en moyenne) maintenus chacun pendant 1 mn 30 de manière à amener le sujet à sa puissance maximale aérobie en 5 à 6 minutes. Chez l'enfant, cette méthode est aussi bien acceptée que chez l'adulte.

Un échauffement est pratiqué avant l'épreuve elle-même. En effet, un exercice d'emblée très important est mal supporté par l'organisme (BARNARD et coll. 1973) et ceci est vrai encore plus pour les enfants. ASMUSSEN et BÖJE en 1945 avaient déjà démontré que $\dot{V}O_2$ max est un peu plus important quand on a pratiqué, préalablement, à sa mesure, un échauffement musculaire.

L'exercice est effectué soit sur un cyclo-ergomètre pour les nageurs et les athlètes, soit sur un tapis roulant pour les footballeurs. On considère, en général, que les valeurs de $\dot{V}O_2$ max sont supérieures de 7 % lors d'une épreuve sur tapis roulant par rapport à une épreuve sur cyclo-ergomètre (HERMANSEN et SALTIN, 1969 - MC KAY et BANISTER, 1976). Chez l'enfant aussi, $\dot{V}O_2$ max est supérieur (MÁČEK et coll. 1976) mesuré sur tapis roulant ($54 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$) que sur bicyclette ($50 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$).

En fait, sans contester le bien fondé de cette opinion quasi générale, il importe de signaler que d'après les nombreuses observations faites dans le laboratoire de Physiologie Respiratoire, la différence dépend en partie du type d'activité habituelle des sujets. Aussi, il n'a jamais été possible d'obtenir de bons résultats sur bicyclette avec des skieurs de fond et les champions cyclistes sont peu aptes à courir sur un tapis roulant. Les nageurs préfèrent nettement la bicyclette. Il n'a pas été possible d'étudier systématiquement ce problème à propos des enfants. Notons cependant qu'en une occasion les deux méthodes de mesure ont été étudiées sur un même garçon de 13 ans actif mais non spécialisé dans un type de sport. Le $\dot{V}O_2$ max mesuré sur cyclo-ergomètre est de $2,02 \text{ l STPD} \cdot \text{min}^{-1}$ avec fréquence cardiaque maximale de 189 pulsations par minute alors qu'il est de $2,01 \text{ l STPD} \cdot \text{min}^{-1}$ sur tapis roulant avec une fréquence

cardiaque maximale de 185 pulsations par minute. Pour ce sujet, on ne retient donc pas de différence entre le $\dot{V}O_2$ mesuré sur cycloergomètre et sur tapis roulant.

Chez l'enfant, comme cela a été longuement discuté dans la thèse de BOTTIN, les critères d'atteinte de $\dot{V}O_2$ max sont quelque peu différents de ceux retenus pour l'adulte, en ce qui concerne la fréquence cardiaque maximale toujours plus élevée et surtout le taux d'acide lactique constamment plus bas.

- la détermination de la puissance maximale anaérobie

Le matériel utilisé est identique à celui décrit par MARGARIA (1966). On a seulement veillé à ce que la hauteur du pas ne soit pas trop importante car les jambes des enfants sont plus courtes. On a donc choisi la limite inférieure préconisée (30,5 cm) par MARGARIA pour que les valeurs ne soient pas perturbées par des difficultés d'ascension pour les enfants les plus jeunes.

L'apprentissage de ce test est très rapide (valeur maximale atteinte en général à la troisième mesure) et cet exercice est bien accepté par les enfants car très court et prêtant à la compétition puisque les valeurs sont lues immédiatement.

- la détermination de la dette maximale d'oxygène

Si le rôle de la dette d'oxygène dans le métabolisme du muscle est connu depuis longtemps (HILL et coll. 1923, MARGARIA et coll. 1933), sa mesure lors de la détermination de l'aptitude physique n'est pas encore utilisée fréquemment aussi bien chez l'adulte que chez l'enfant.

De nombreuses techniques ont été décrites pour la détermination de la dette d'oxygène.

. Certains auteurs apprécient l'efficacité du métabolisme anaérobie comme équivalente à la production d'acide lactique déterminée après l'exercice submaximal (HUCKABEE, 1958 - KNUTTGEN, 1962 - WASSER - MAN et coll. 1965 - DAVIES et CROCKFORD, 1971) ou supramaximal (KATCH, 1973 - CERRETELLI et coll. 1975) par rapport au taux

de lactate au repos. Ils convertissent alors le taux de lactate en équivalent O₂ soit :

0,5 mM d'O₂ (11,2 ml) par mM d'acide lactique.

. SZÖGÛ et CHEREBETIU (1974) ont décrit une méthode de mesure de la capacité anaérobie basée sur un exercice pratiqué sur bicyclette ergométrique en pédalant à puissance maximale aussi rapidement que possible pendant une minute. Dans ces conditions, 74,4% du travail total fourni est d'origine anaérobie et correspond donc au déficit en oxygène.

. VOLVOK et coll. (1975) ont pour leur part déterminé la capacité anaérobie comme étant équivalente au taux de CO₂ rejeté en excès par rapport à la consommation d'oxygène lors d'un exercice supramaximal.

En fait, le déficit et la dette d'oxygène augmentent avec la puissance développée (McMIKEN, 1976 - SCHNEIDER et coll. 1968 - MARGARIA et coll. 1963), de même que le taux d'acide lactique (HERMANSEN et STENSVOLD, 1972), et l'état stable est atteint d'autant plus vite que l'exercice est intense (WHIPP et coll. 1972, CRAIG 1972). Pour les exercices supramaximaux mettant en jeu de façon prépondérante le métabolisme anaérobie lactique, il apparaît selon ASTRAND et SALTIN (1961) que les exercices dont la puissance est comprise entre 115 et 135 % de la puissance maximale aérobie amènent à l'épuisement en 2 à 3 minutes en moyenne, tout en permettant d'atteindre $\dot{V}O_2$ max en fin d'exercice. L'exercice ne doit pas être inférieur à une minute sinon on ne peut atteindre le maximum des possibilités anaérobies du muscle (MARGARIA et coll. 1969).

Compte tenu de ces impératifs et après un certain nombre d'essais chez l'enfant, la puissance optimale s'est révélée voisine de 115 % de la puissance maximale aérobie. Un tel exercice supra maximal est maintenu en moyenne 2 mn 30 sec (1 mn 59 sur cyclo ergomètre et 3 mn 02 sur tapis roulant).

Un exercice de 125 % comme chez l'adulte (DENIS, Thèse LYON 1977) ne peut être maintenu suffisamment longtemps pour déterminer la dette maximale d'oxygène (40 à 50 sec en moyenne).

Il faut noter également que le sujet testé, lorsqu'il arrive à l'épuisement, doit stopper brutalement son exercice car la poursuite d'un exercice aérobique après l'exercice supra maximal diminue la valeur de la dette d'oxygène et accélère le métabolisme de l'acide lactique (GISOLFI et coll. 1966, BELCASTRO et BONEN, 1975).

3 - Analyse des valeurs obtenues

- la consommation maximale d'oxygène

Un précédent travail (auquel on peut se rapporter pour trouver les références concernant ce test chez l'enfant), a été réalisé au laboratoire par BOTTIN (Thèse, LYON 1977) et a étudié l'évolution de la consommation maximale d'oxygène chez l'enfant de 11 à 16 ans.

Comme lui, on retient que le métabolisme aérobique est déjà très important chez l'enfant puisque la valeur de la consommation maximale d'oxygène rapportée à l'unité de poids corporel est maximale dès l'enfance. Les valeurs moyennes sont en effet de $45 \text{ ml.min}^{-1}.\text{kg}^{-1}$ chez le garçon et de $38 \text{ ml.min}^{-1}.\text{kg}^{-1}$ chez la fille, ce qui correspond aux valeurs moyennes de l'adulte jeune sédentaire. NAGLE et coll. (1977) ont récemment mesuré la consommation maximale d'oxygène chez de jeunes américains de 14 à 17 ans et ont trouvé des valeurs de l'ordre de $41 \text{ ml.kg}^{-1}.\text{min}^{-1}$ chez les filles et de $55 \text{ ml.kg}^{-1}.\text{min}^{-1}$ chez les garçons.

L'influence de la pratique régulière d'une activité sportive est marquée par l'accroissement de $\dot{V}O_2 \text{ max}$ qui est de $57 \text{ ml.min}^{-1}.\text{kg}^{-1}$ chez les garçons sportifs et de $52 \text{ ml.min}^{-1}.\text{kg}^{-1}$ chez les filles sportives de notre étude.

On peut noter aussi, qu'une activité physique importante sans qu'elle soit nécessairement due à un entraînement sportif, augmente également $\dot{V}O_2 \text{ max}$ car nos sujets "témoins" ont une consommation maximale d'oxygène supérieure à la moyenne des enfants de même âge sédentaires :

$51 \text{ ml.min}^{-1}.\text{kg}^{-1}$ chez les garçons,

$43 \text{ ml.min}^{-1}.\text{kg}^{-1}$ chez les filles.

- la puissance maximale anaérobie

La puissance maximale anaérobie exprimée comme étant la composante verticale de la vitesse maximale atteinte lors d'un exercice consistant à courir aussi rapidement que possible dans un escalier de dimensions connues augmente avec l'âge pour passer de 1,24 à 1,47 $\text{kgm.kg}^{-1}.\text{sec}^{-1}$ chez le garçon de 10 à 15 ans et de 1,23 à 1,37 chez les filles de même âge.

Cette évolution est surtout nette entre 10 et 13 ans. On ne retient aucune différence significative entre les valeurs obtenues chez les garçons et chez les filles et le niveau d'activité physique ne semble pas influencer le métabolisme anaérobie alactique puisque les enfants de 10-11 ans ne pratiquant pas de sport ont des résultats sensiblement identiques à ceux des enfants sportifs de même âge.

MARGARIA (1966), en décrivant ce test, exprime son évolution avec l'âge chez des sujets sédentaires. Ainsi, à 10 ans, la vitesse maximale est de l'ordre de 1,0 m.sec^{-1} . Elle augmente ensuite avec l'âge pour atteindre son maximum (1,45 m.sec^{-1}) à 20 ans. La figure 20 exprime les résultats obtenus lors de nos tests par rapport à la référence représentée par les valeurs indiquées par MARGARIA. Nos résultats sont en moyenne supérieurs à ceux de MARGARIA.

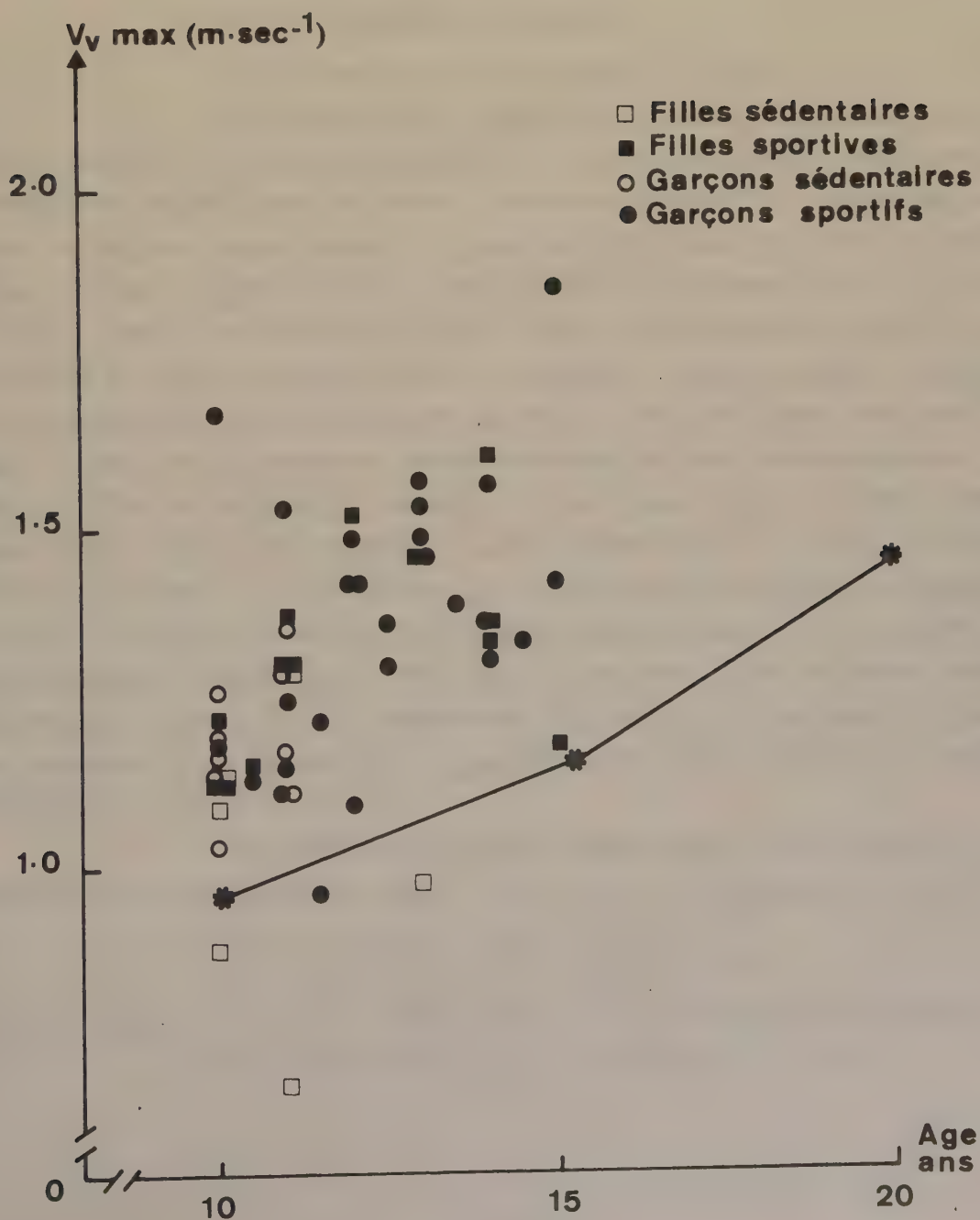
D'autres auteurs ont mesuré la puissance maximale anaérobie chez l'enfant :

STEPLOCK et coll. (1970) ont étudié une population subalpine (Italie du Nord) et retrouvent cette évolution décrite par MARGARIA chez les garçons : 1,15 m.sec^{-1} à 10 ans jusqu'à 1,50 m.sec^{-1} à 20 ans ;
et chez les filles : 1,00 m.sec^{-1} à 10 ans jusqu'à 1,30 m.sec^{-1} à 20 ans.

CUMMING (1972) a étudié ce test chez des enfants sportifs (volley-ball et course) de 12 à 17 ans et trouve des valeurs supérieures :

1,61 m.sec^{-1} pour les filles,
1,68 m.sec^{-1} pour les garçons.

FIGURE 20 : Résultats obtenus lors de la détermination de la puissance maximale anaérobie pour tous les enfants testés.
La ligne continue exprime les valeurs de référence de ce test citées par MARGARIA et obtenues à partir de la moyenne de tous ses résultats dans chaque tranche d'âge.



En somme, les valeurs de la puissance maximale rapportée à l'unité de poids corporel sont, dès l'enfance, très proches de celles qu'elles atteignent à l'âge adulte. La part du métabolisme anaérobie alactique est donc, chez l'enfant, sensiblement identique à celle de l'adulte. L'entraînement n'améliore pas les valeurs de ce test (HOUSTON, 1977) mais il semble plutôt que les enfants orientent leur spécialité vers la course de vitesse ou plus généralement les sports qui nécessitent des libérations d'énergie très importantes en peu de temps (saut, lancer...) en fonction de leur aptitude naturelle pour ces sports.

- la dette maximale d'oxygène

. les mesures effectuées au repos

La mesure de la dette maximale d'oxygène nécessite la connaissance de la consommation d'oxygène au repos. Pour cela, nous avons mesuré, par une méthode à circuit ouvert, la consommation d'oxygène du sujet juste avant le test de détermination de la dette maximale en installant celui-ci en position allongée dans un fauteuil "relax" dans une ambiance aussi calme que possible. Cette détermination directe de $\dot{V}O_2$ de repos avant l'exercice, nous a semblé préférable à la lecture de la consommation basale d'oxygène dans des tables connaissant l'âge et la surface cutanée du sujet car correspondant plus à la réalité de la mesure, l'enfant n'étant pas, juste avant l'exercice, dans des conditions basales (172 ml STPD.min⁻¹ à 10-11 ans et 261 ml STPD.min⁻¹ à 14-15 ans). Les valeurs trouvées correspondent à un état de repos puisque le volume expiré est de 7,6 l BTPS.min⁻¹ et le quotient respiratoire de 0,82 en moyenne, les valeurs théoriques étant 6,1 l BTPS.min⁻¹ (rapportée à l'unité de surface corporelle) soit en moyenne 8,1 l BTPS.min⁻¹, et de 0,85 pour le quotient respiratoire (DENOLIN et coll., 1964).

Ces résultats sont sensiblement identiques à ceux mesurés par ERIKSSON et KOCH (1973) chez des garçons de 11 à 13 ans :

$$\dot{V}O_2 \text{ de repos} = 0,23 \text{ l STPD.min}^{-1}$$

$$\dot{V}_E \text{ de repos} = 7,3 \text{ l BTPS.min}^{-1}$$

et par INBAR et BAR-OR (1975) chez des garçons plus jeunes de 7 à 9 ans

$$\dot{V}O_2 \text{ de repos} = 0,19 \text{ l STPD.min}^{-1}$$

. l'exercice supra maximal

Nous avons vu précédemment pourquoi sa puissance a été fixée à 115 % de la puissance maximale aérobie.

Dans ce cas, l'exercice supra maximal est maintenu en moyenne 2 mn 30. Le temps que dure l'exercice est significativement différent ($0,001 < p < 0,01$) selon l'ergomètre utilisé soit 1 mn 59 sec sur bicyclette et 3 mn 2 sec sur tapis roulant. Mais, l'âge du sujet n'influence pas la durée de l'exercice.

La valeur de $\dot{V}O_2$ atteinte à l'épuisement du sujet représente en moyenne 95,8 % (84 - 100) de $\dot{V}O_2$ max soit 96,2 % chez les garçons et 95,5 % chez les filles.

On connaît l'influence de la motivation du sujet sur la valeur des tests, les individus plus motivés pouvant supporter plus longtemps la douleur associée à l'augmentation du taux d'acide lactique (WILMORE, 1968). Mais dans la présente étude, les enfants sportifs étaient très motivés car ces tests représentaient pour eux une image de leur valeur personnelle.

Les jeunes écoliers témoins avaient l'habitude de fournir des exercices intenses et sont allés à la limite de leurs possibilités.

D'ailleurs, les valeurs comparées de la fréquence cardiaque maximale atteinte en fin d'exercice et du taux d'acide lactique deux minutes après l'arrêt de l'exercice après $\dot{V}O_2$ max et après exercice supra maximal (Tableau VII, Figures 21-22) montrent bien que les enfants ont atteint leur maximum. En effet, les valeurs de la fréquence cardiaque maximale après $\dot{V}O_2$ max et après exercice supra maximal ne sont pas significativement différentes pour les plus jeunes enfants (10-11 ans) et sont à la limite de la signification pour les plus âgés (12 à 15 ans). Le taux d'acide lactique est constamment supérieur après exercice supra maximal qu'après $\dot{V}O_2$ max.

. le taux d'acide lactique sanguin

SHEPHARD (1971) a déjà noté que la cinétique de l'acide lactique était plus rapide chez l'enfant que chez l'adulte car le passage de ce métabolite se fait plus facilement du muscle au milieu extra-cellulaire. Nous avons vérifié ce fait chez plusieurs enfants. Pour cela, nous avons pratiqué sur trois enfants des

A : chez les garçons de 10 à 15 ans

GARÇONS		10-11 ans		12-13 ans		14-15 ans	
F.C. min ⁻¹	$\dot{V}O_2$ Max	12	202 ± 3	15	203 ± 2	19	200 ± 1
	Dette max	12	195 ± 2	15	195 ± 2	18	194 ± 2
A.L. mg.100ml ⁻¹	$\dot{V}O_2$ max	12	65 ± 5	15	71 ± 5	19	72 ± 5
	Dette max	12	84 ± 6	15	87 ± 5	18	92 ± 6

B : chez les filles de 10 à 15 ans

FILLES		10-11 ans		12-13 ans		14-15 ans	
F.C. min ⁻¹	$\dot{V}O_2$ Max	8	200 ± 4	3	193 ± 5	4	200 ± 2
	Dette max	8	196 ± 4	3	183 ± 5	4	193 ± 3
A.L. mg. 100 ml ⁻¹	$\dot{V}O_2$ Max	8	69 ± 3	3	51 ± 12	4	73 ± 21
	Dette max	8	77 ± 15	3	80 ± 4	4	89 ± 18

TABLEAU VII

Comparaison de la fréquence cardiaque maximale (F.C. et du taux d'acide lactique sanguin (A.L.) après l'épreuve de détermination de $\dot{V}O_2$ max et après celle de détermination de la dette maximale d'oxygène.

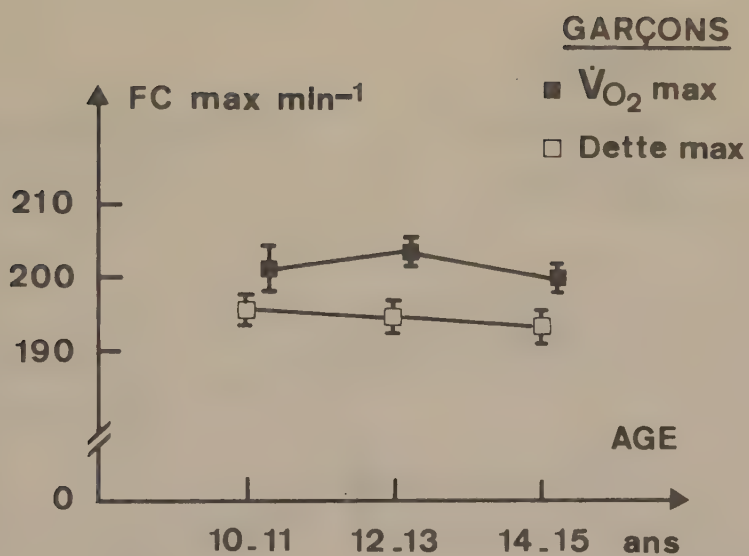


FIGURE 21 : Comparaison des fréquences cardiaques maximales atteintes pendant l'exercice maximal et l'exercice supra maximal chez les garçons.

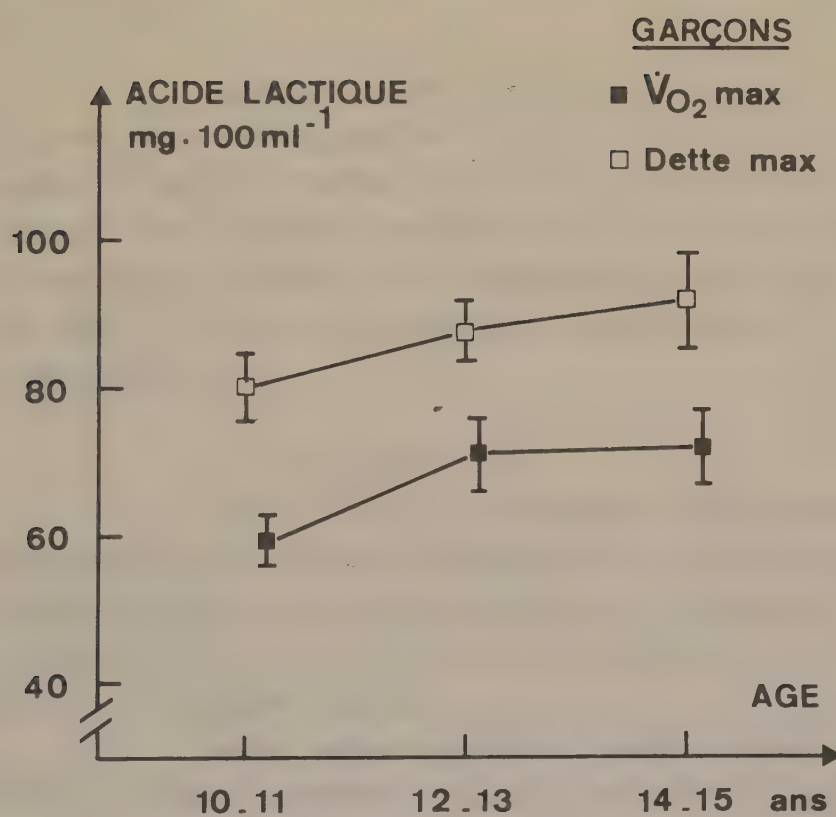


FIGURE 22 : Comparaison du taux maximal d'acide lactique atteint deux minutes après l'exercice maximal et après l'exercice supra maximal chez les garçons.

prélèvements de $50 \mu\text{l}$ de sang capillaire au bout du doigt toutes les 15 secondes du temps 0 (après l'arrêt de l'exercice) au temps 4 minutes (figure 23 A) et sur trois autres enfants des prélèvements identiques toutes les minutes du temps 0 à 5 minutes puis toutes les 5 minutes de 10 à 25 minutes (figure 23 B).

L'analyse de ces résultats montre bien, en effet, que le taux maximal est atteint entre 1 mn 30 et 2 mn 30 et qu'il est déjà significativement abaissé à 5 minutes, temps du prélèvement chez l'adulte.

Mesuré dans ces conditions, le taux maximal d'acide lactique est de l'ordre de $88 \text{ mg.100 ml}^{-1}$ ($9,7 \text{ mM.l}^{-1}$), la plus forte concentration étant de $143 \text{ mg.100 ml}^{-1}$ ($15,9 \text{ mM.l}^{-1}$) chez un footballeur de 15 ans.

SHEPHARD (1971) a trouvé des valeurs sensiblement identiques soit $80 \text{ mg.100 ml}^{-1}$ chez des garçons de 10 à 12 ans deux minutes après l'arrêt de l'exercice, et KLINT et coll. (1976) ont obtenu des valeurs plus élevées à la suite d'une course de 800 m pratiquée dans le cadre de la gymnastique scolaire, soit 94 mg.100ml^{-1} ($10,45 \text{ mM.l}^{-1}$) chez les filles et $103 \text{ mg.100 ml}^{-1}$ ($11,45 \text{ mM.l}^{-1}$) chez les garçons.

. la récupération

Chez l'adulte, la mesure de $\dot{V}O_2$ après l'exercice supra maximal doit durer au minimum 30 à 40 minutes pour atteindre la valeur de repos de la consommation d'oxygène car la phase lente de récupération a un $t_{\frac{1}{2}}$ de 15 à 20 minutes pour un exercice supra maximal (DI PRAMPERO, 1972).

Mais, chez l'enfant, compte tenu de la cinétique plus rapide de l'acide lactique et de la relation liant dette d'oxygène et taux d'acide lactique, il apparaît que $\dot{V}O_2$ doit retrouver plus vite sa valeur de repos après un exercice. Aussi, le recueil des gaz expirés a été pratiqué sur 20 minutes seulement.

L'étude des résultats montre que cette durée est suffisante.

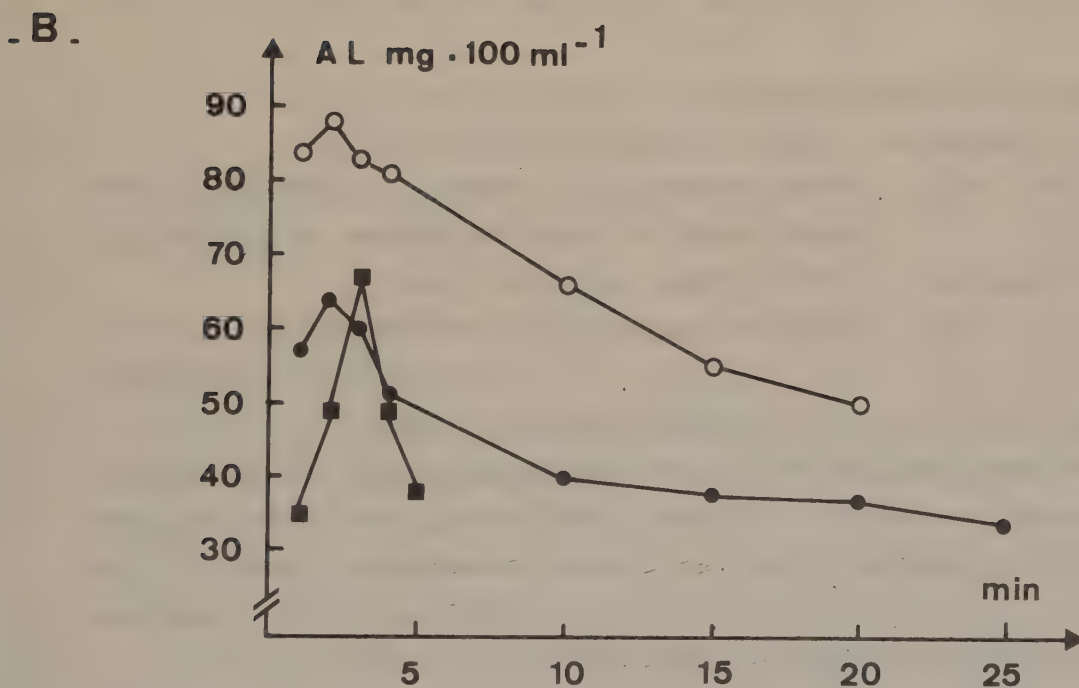
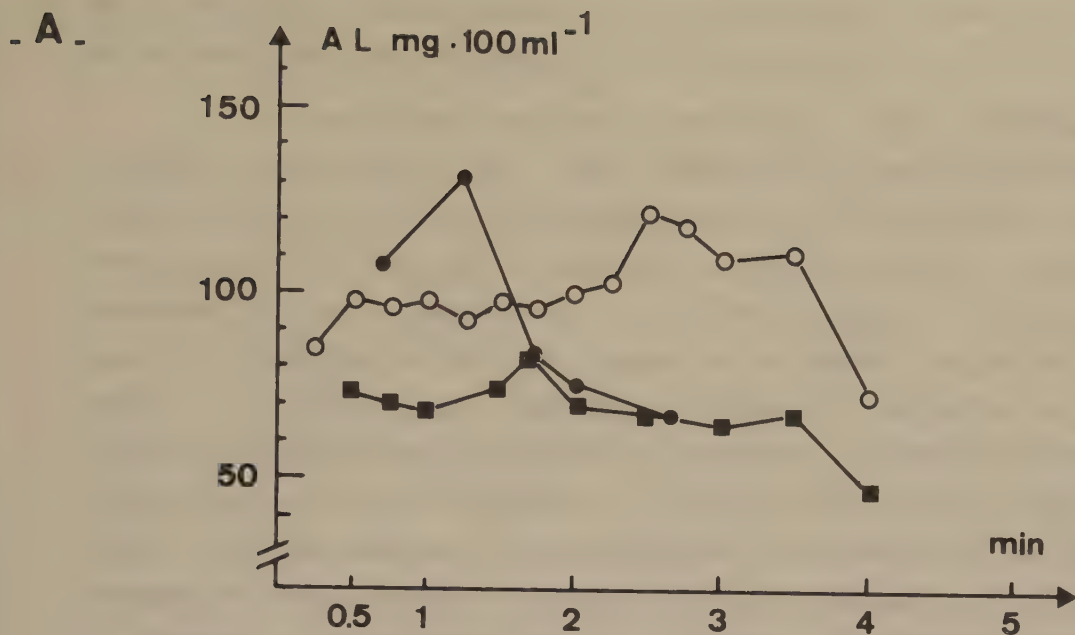


FIGURE 23 : Evolution du taux d'acide lactique sanguin en fonction du temps depuis l'arrêt de l'exercice supra maximal.

A - Echantillons sanguins prélevés toutes les 15 secondes pendant 5 minutes.

B - Echantillons sanguins prélevés toutes les minutes pendant 5 minutes puis toutes les 5 minutes pendant 20 minutes.

En effet :

- la différence entre $\dot{V}O_2$ atteint 20 minutes après l'arrêt de l'exercice et $\dot{V}O_2$ mesuré au repos avant l'exercice n'est pas significative pour les enfants, filles et garçons de 10 à 13 ans ;

- pour les enfants plus âgés, cette différence est significative ($0,02 < p < 0,05$). C'est pourquoi la dette maximale a été déterminée sur 25 minutes de récupération en extrapolant la courbe de décroissance de $\dot{V}O_2$ sur 5 minutes supplémentaires. La valeur de $\dot{V}O_2$ obtenue de cette manière à la 25ième minute n'est plus significativement différente du $\dot{V}O_2$ de repos et la dette calculée sur 25 minutes est, elle aussi, non significativement différente de celle calculée sur une période de 20 minutes. L'erreur introduite dans le calcul de la dette sur 20 minutes au lieu de 25 minutes n'est que de 3,4 %. Donc, la limitation à une durée de 20 minutes de la mesure des échanges gazeux après l'exercice supra maximal est suffisante pour l'ensemble des enfants de 10 à 15 ans. Il faudrait cependant tenir compte de l'évolution de la cinétique des échanges gazeux avec l'âge pour les études ultérieures sur les adolescents de 15 à 18 ans.

. le calcul de la dette maximale d'oxygène

La dette d'oxygène réelle correspond à la différence entre $\dot{V}O_2$ mesuré pendant 20 minutes après l'arrêt de l'exercice et $\dot{V}O_2$ de repos mesuré pendant le même temps.

Chez l'adulte, KATCH (1973) a mesuré une dette maximale de 9,1 litres pendant 60 minutes. MARGARIA (1967) a lui trouvé des valeurs de 7,5 litres.

DENIS (Thèse, LYON 1977) a cité dans son travail les résultats de dettes maximales mesurées par KARLSSON et coll. (1967) sur des athlètes spécialisés dans la course. La valeur moyenne est de 8 litres. Lui-même a mesuré la dette maximale pendant 37 minutes sur des joueurs de hand-ball soit 6,23 l.

Mais, ces résultats représentent la dette effective d'oxygène c'est-à-dire la moitié de la dette réelle si l'on considère que la dégradation de l'acide lactique nécessite deux fois plus d'oxygène que sa production. Dans ces conditions, la dette d'oxygène représente le double du déficit. En effet, la dette d'oxygène est

supérieure au déficit quand la durée de l'exercice est inférieure à 4 minutes c'est-à-dire avant que $\dot{V}O_2$ ait atteint l'état stable. Par contre, la dette est égale au déficit pour les exercices dépassant la durée de 4 minutes (WHIPP et coll., 1970 - KNUTTGEN, 1970). Mais rien ne permet de conclure aux mêmes résultats chez l'enfant.

Les valeurs de la dette réelle d'oxygène et du taux maximal d'acide lactique sont beaucoup plus faibles chez l'enfant. Ce résultat est à opposer à celui de la puissance maximale anaérobie permettant de penser que la part alactique du métabolisme anaérobie est superposable à celle de l'adulte. Aussi la répartition des deux composantes rapide et lente de la récupération doit elle être différente chez l'enfant. C'est pourquoi, nous préférons conserver la valeur de la dette réelle sans préjuger ainsi de cette répartition.

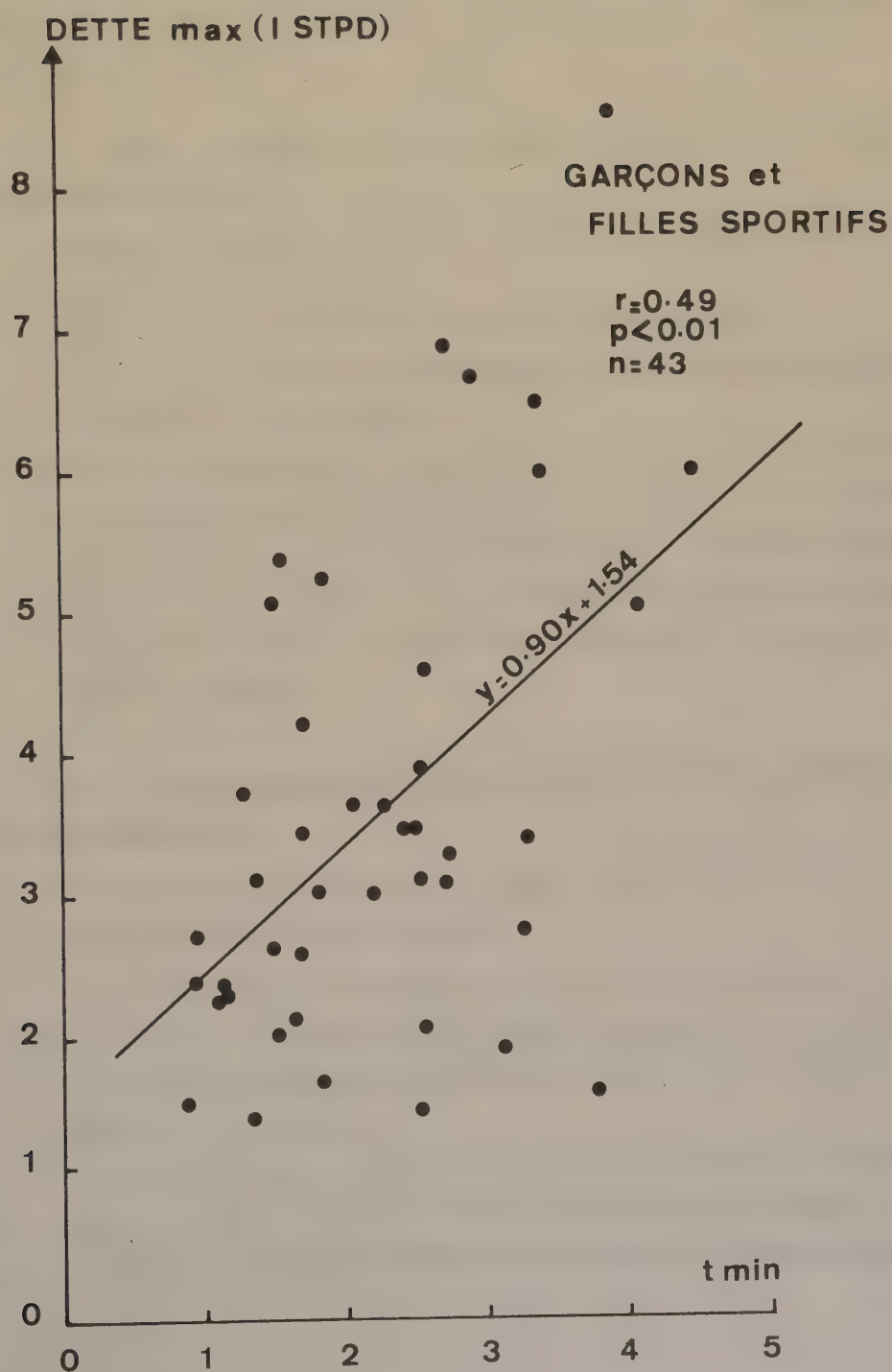
. les résultats

Les valeurs de la dette maximale sont très faibles par rapport à celles de l'adulte puisque la dette maximale représente 2,21 l STPD chez le garçon de 10-11 ans et évolue au cours de son développement pour atteindre 5,06 l STPD à 14-15 ans. Chez les filles, l'évolution est nette entre 10 et 13 ans (1,91 à 3,22 l STPD) mais s'arrête après la poussée de croissance pubertaire. La valeur de la dette maximale augmente avec le temps qu'a duré l'épreuve supra maximale. La relation est représentée sur la figure 24 par la droite de régression $y = 0,90 x + 1,54$ avec $r = 0,49$ et $p < 0,01$.

Les seules valeurs de dette d'oxygène mesurée chez l'enfant d'âge scolaire non précisé sont rapportés par ALLEN et coll. 1969 et SHEPHARD et coll. 1969-1971 mais la dette d'oxygène est mesurée sur 11 minutes après un exercice maximal. Elle atteint dans ces conditions 2,44 l STPD chez les garçons et 1,76 l STPD chez les filles.

Nous avons étudié les facteurs dont dépend cette dette maximale d'oxygène. Il apparaît qu'il existe une relation étroite entre dette maximale (l STPD) et $\dot{V}O_2 \text{ max}$ (l STPD.min⁻¹)

FIGURE 24 : Droite de régression représentant l'évolution de la dette maximale d'oxygène (l STPD) en fonction de la durée de l'exercice supra maximal.



(figure 25). On note aussi une relation, moins nette cependant, entre la valeur de la dette maximale (l STPD) et la puissance maximale anaérobie ($\text{kgm.kg}^{-1}.\text{sec}^{-1}$) représentée par la corrélation $r = 0,4583$ ($p = 0,01$) (figure 26). De même, il existe une corrélation ($r = 0,291$) entre le taux maximal d'acide lactique et la dette maximale d'oxygène (figure 27). En effet, la dette d'oxygène dépend de la valeur de $\dot{V}O_2$ atteint en fin d'exercice (soit $\dot{V}O_2 \text{ max}$), de la puissance maximale anaérobie par sa composante rapide alactique et du taux d'acide lactique par sa composante lente lactique (DI PRAMPERO et coll. 1969-1973 - PIIPER et coll. 1968-1970 - CERRETELLI et coll. 1969).

Chez l'enfant, les valeurs faibles de la dette maximale s'expliquent donc :

- par un $\dot{V}O_2 \text{ max}$ en valeur absolue (l STPD.min^{-1}) plus faible que l'adulte ;
- par un taux d'acide lactique plus faible ;
- par une cinétique plus rapide de l'acide lactique (taux maximal à 2 minutes) ;
- par un équipement enzymatique musculaire incomplet comme l'a montré ERIKSSON en 1973. En effet, la concentration musculaire en phosphofructokinase (enzyme intervenant dans la dégradation du glycogène en acide lactique) est inférieure chez l'enfant par rapport à ce qu'elle est chez l'adulte.

4 - Part relative des métabolismes chez l'enfant au cours de l'activité physique.

L'étude des trois métabolismes intervenant dans l'exercice musculaire a montré que chez l'enfant :

- le métabolisme aérobie est, en valeur relative par rapport au poids corporel, supérieur ou égal à celui de l'adulte ;
- le métabolisme anaérobie alactique est sensiblement identique à celui de l'adulte ;
- le métabolisme anaérobie lactique est en revanche presque inexistant chez le jeune enfant (dette maximale tout juste égale à 2 litres) et augmente progressivement au cours du développement.

FIGURE 25 : Droite de régression représentant l'évolution, en valeur absolue, de la dette maximale d'oxygène (l STPD) en fonction de la consommation maximale d'oxygène (l STPD.min⁻¹).

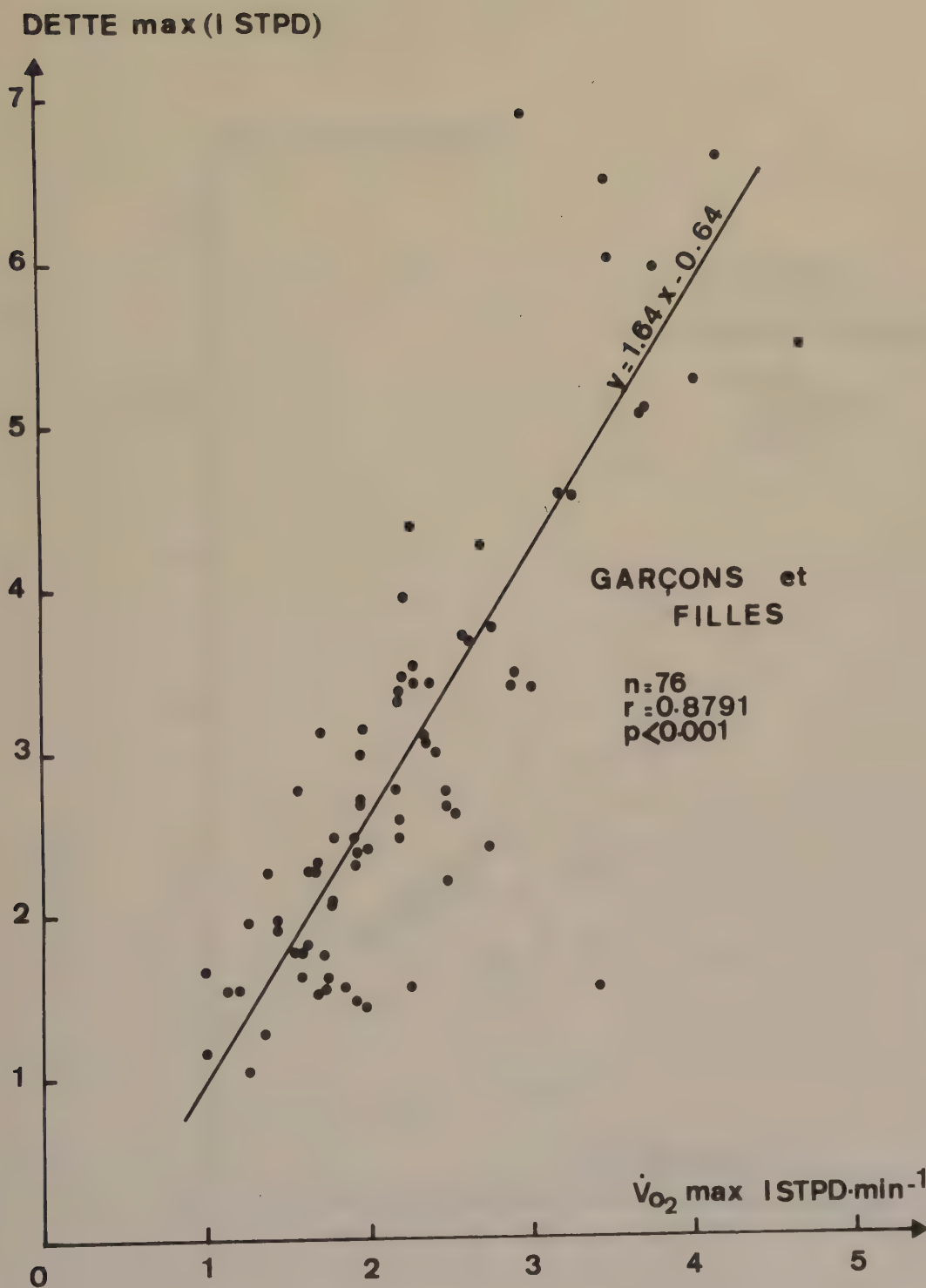


FIGURE 26 : Droite de régression représentant l'évolution de la dette maximale d'oxygène (l STPD) en fonction de la puissance maximale anaérobie ($\text{kgm} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{sec}^{-1}$).

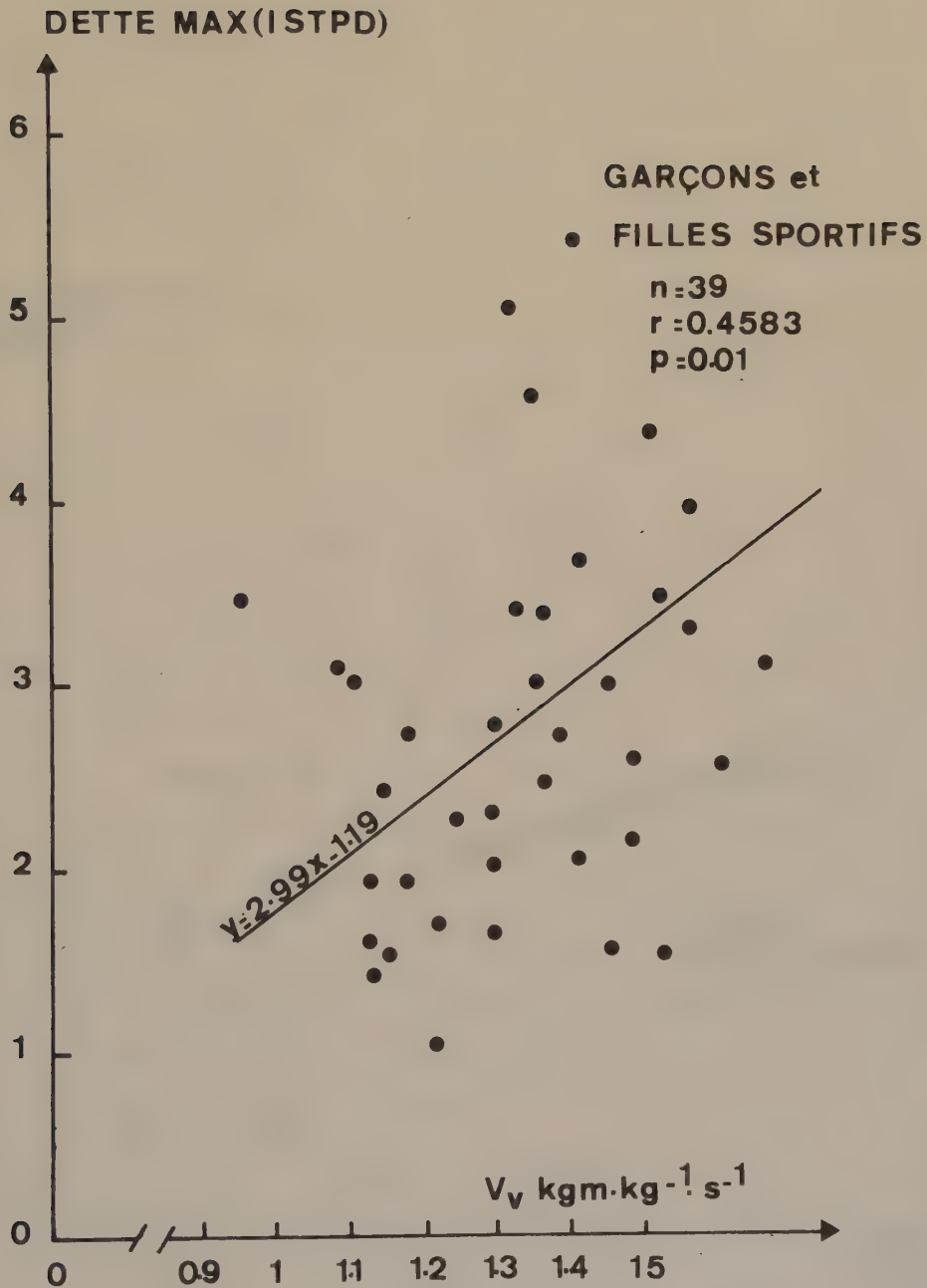
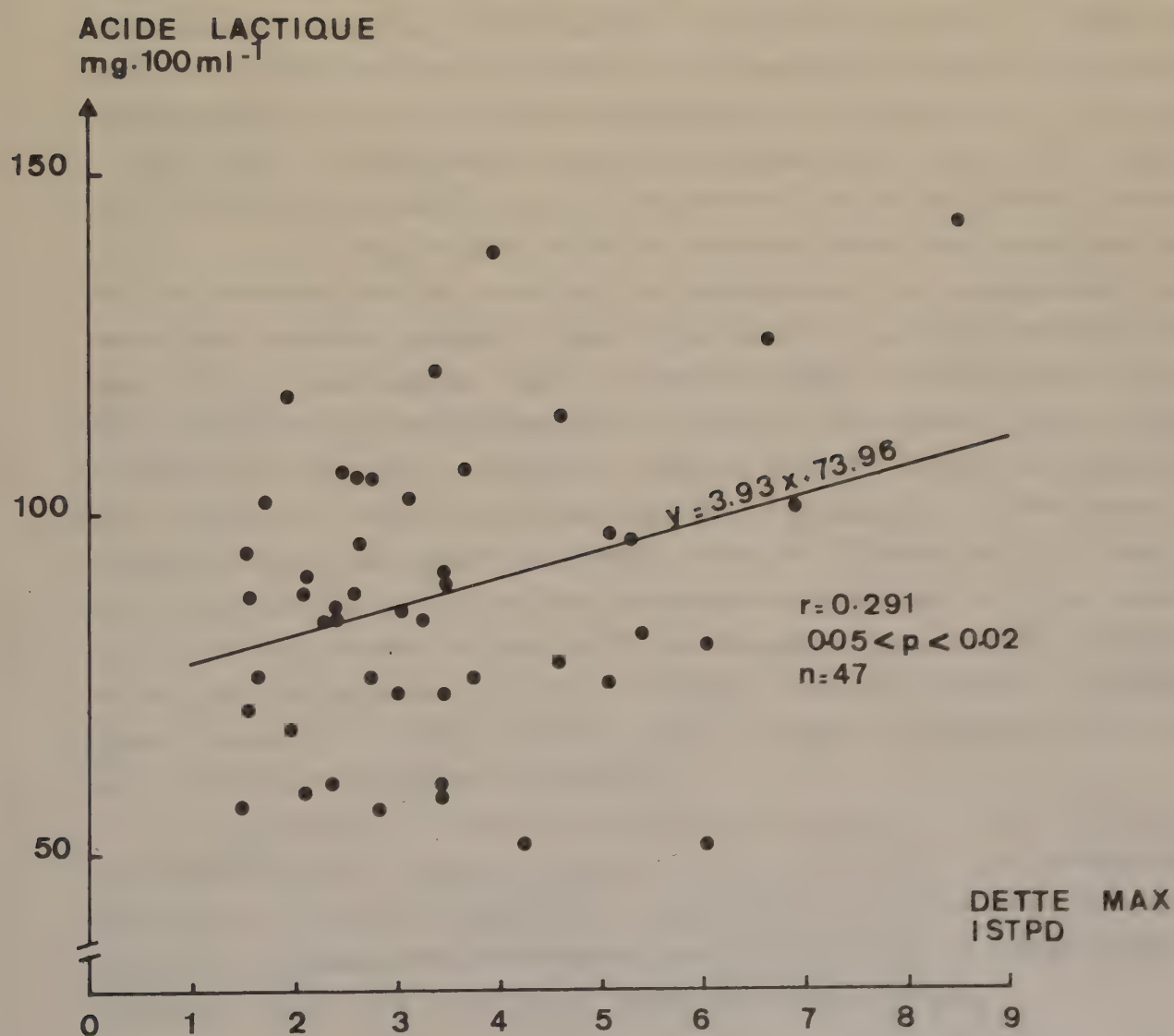


FIGURE 27 : Droite de régression représentant l'évolution du taux maximal d'acide lactique sanguin atteint 2 minutes après l'exercice supra maximal, en fonction de la dette maximale d'oxygène.



Si l'on se reporte à la figure de HOWALD (page 9) concernant la cinétique des différents processus de fourniture d'ATP lors de l'exercice musculaire, on constate que la "carence" des processus de glycolyse anaérobie chez l'enfant amène à se questionner sur l'origine de l'ATP une fois que les réserves anaérobies alactiques ont été épuisées. Le relais ne peut se concevoir que par une cinétique plus rapide de la glycolyse aérobie et donc par une adaptation également plus rapide de la consommation d'oxygène.

Ce point important a été vérifié techniquement au laboratoire sur un sujet de 11 ans. Il est impossible avec les méthodes habituelles de connaître les échanges gazeux sur des périodes très brèves depuis le début de l'exercice jusqu'à l'état d'équilibre. Un calculateur conçu au laboratoire a donc été utilisé. Il permet des mesures de $\dot{V}O_2$ sur des périodes de 15 secondes grâce à une mesure instantanée de $\dot{V}_E$ par pneumotachographe et intégrateur, et de F_{ECO_2} et F_{EO_2} par les analyseurs rapides BECKMAN déjà cités, la valeur de $\dot{V}O_2$ peut être lue toutes les 15 secondes sur un voltmètre numérique.

La comparaison dans un premier temps des résultats obtenus par la méthode des sacs et par le calculateur en superposant les valeurs sur un même graphe (figure 28) montre que les résultats sont tout à fait concluants. Dans un second temps, l'évolution de $\dot{V}O_2$ a été contrôlée automatiquement à l'aide du calculateur dès le début de l'exercice et jusqu'à quelques minutes après l'arrêt de l'exercice. La cinétique a été déterminée pour deux puissances différentes : 80 % et 115 % de la puissance maximale aérobie (figure 29). On note tout de suite que la cinétique des processus oxydatifs est plus rapide chez l'enfant comme le démontre la figure 30 comparant le temps nécessaire pour atteindre la valeur maximale de $\dot{V}O_2$ lors de l'expérience chez l'enfant et chez l'adulte pour les mêmes puissances (80 et 115 % de la puissance maximale aérobie).

Donc, le métabolisme aérobie est mis en jeu beaucoup plus rapidement chez l'enfant pour pallier la faiblesse du métabolisme anaérobie lactique. Sans doute, la cinétique évolue-t-elle comme évolue le métabolisme anaérobie lactique pendant le développement de l'enfant mais nous n'avons pu réaliser cette étude.

FIGURE 28 : Comparaison des deux techniques de mesure de la dette maximale d'oxygène :

- par la méthode des sacs de DOUGLAS. ●
- par le calculateur ○

Les trois points encerclés correspondent à 3 mesures de $\dot{V}O_2$ perturbées par un changement de position du sujet.

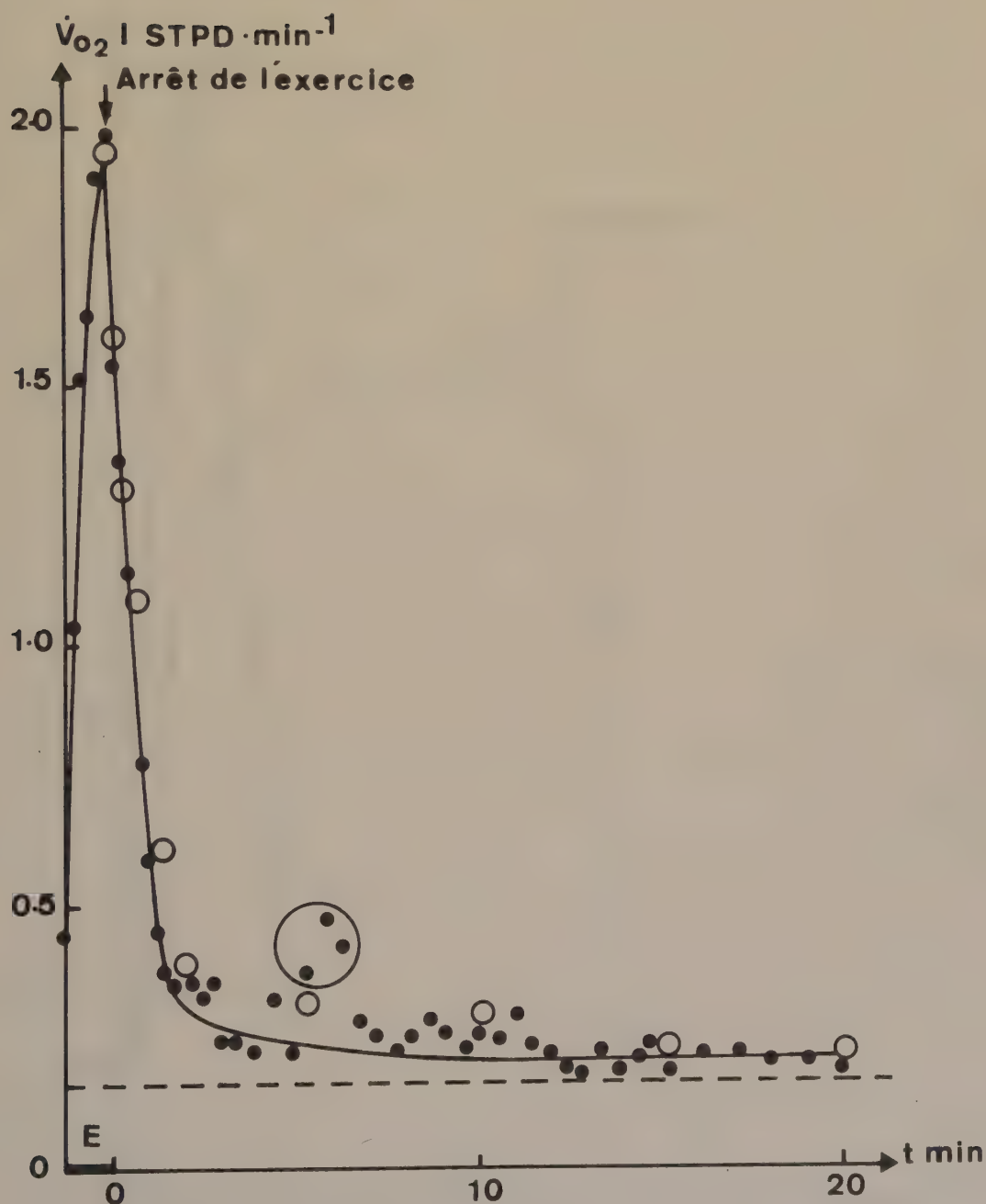


FIGURE 29 : Evolution de $\dot{V}O_2$ en fonction du temps mesuré dès le début de l'exercice au cours de 2 exercices de puissances différentes : 80 et 115 % de la puissance maximale aérobie.
Les flèches indiquent le moment où l'enfant est arrivé à épuisement.

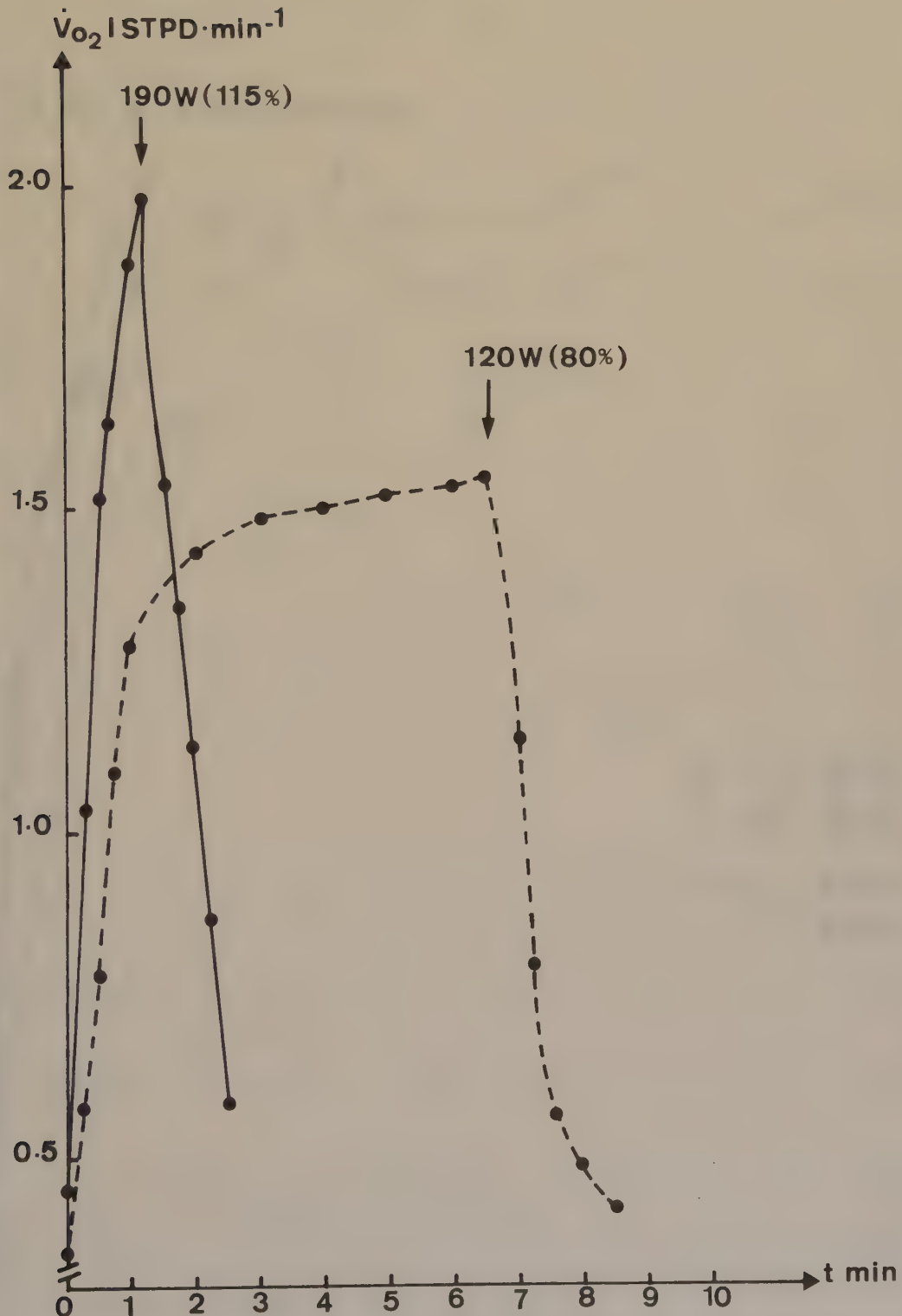
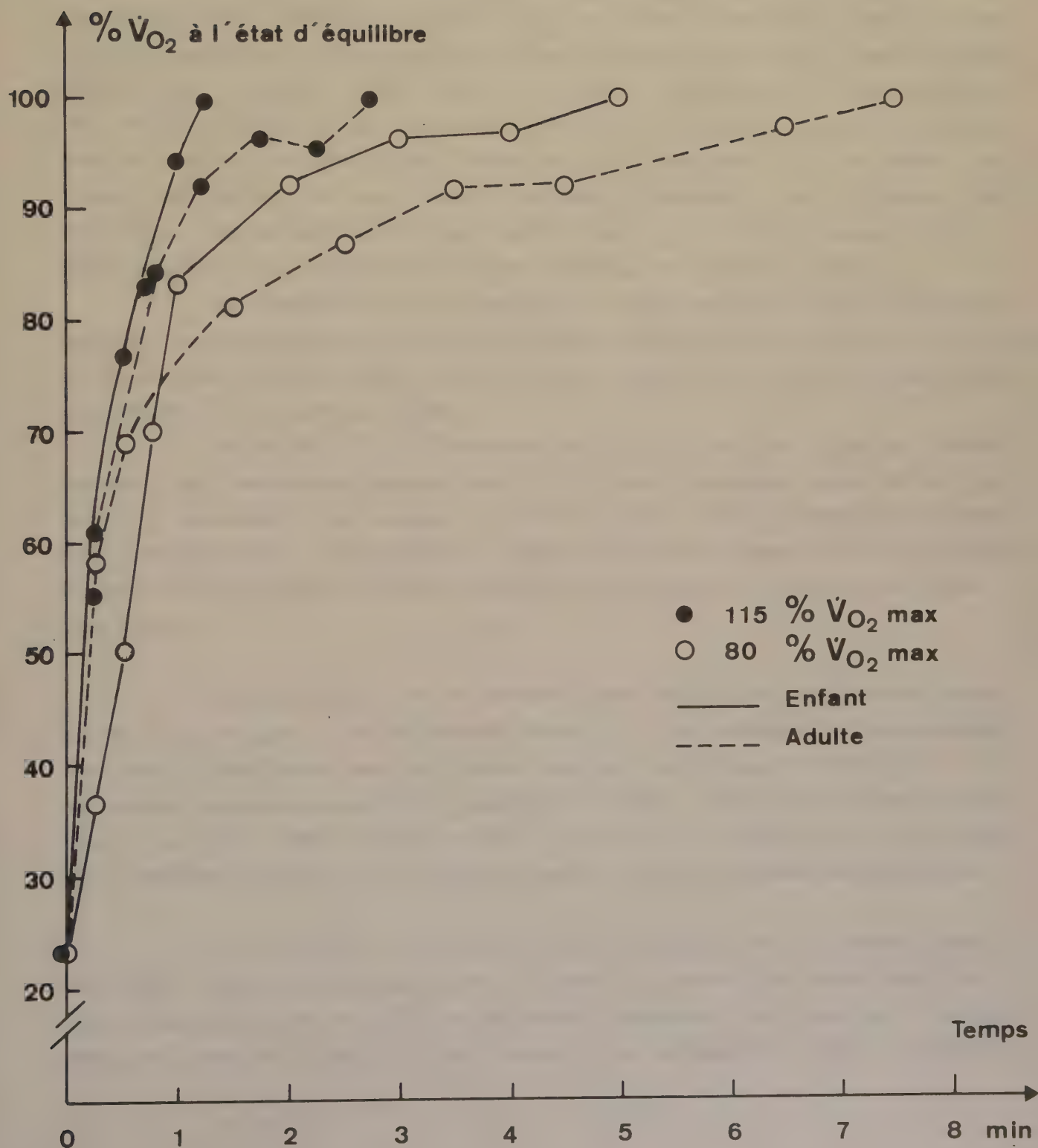


FIGURE 30 : Comparaison du temps nécessaire pour atteindre la valeur maximale de $\dot{V}O_2$, chez l'enfant et chez l'adulte, au cours de 2 exercices représentant 80 et 115 % de la puissance maximale aérobie.



5 - Le rôle de l'entraînement sur l'aptitude physique des enfants et sur le développement des différents métabolismes.

De très nombreux auteurs ont étudié le rôle de l'entraînement physique sur le développement statural de l'enfant et sur la capacité de son métabolisme aérobie représenté par la détermination de $\dot{V}O_2$ max (EKBLÖM 1969-1971, DOBELN et ERIKSSON 1972, KOCH et ERIKSSON 1972, YAMAJI et coll. 1977) et tous s'accordent pour donner un rôle important à la pratique d'un entraînement sur le métabolisme aérobie de l'enfant (15 à 30 %). De plus, l'étude de la variabilité des mesures d'aptitudes physiques dans un groupe d'enfants entraînés montre que les valeurs sont beaucoup plus groupées que les mêmes mesures pratiquées sur un groupe d'enfants témoins. L'entraînement réduit donc la variabilité inter-individuelle et ceci d'autant plus qu'elle était initialement élevée (CORROL et CURETON, 1967).

En comparant les résultats de $\dot{V}O_2$ max dans les différents sports, on peut noter que d'une manière générale les valeurs sont plus faibles chez les athlètes que chez les autres sportifs et plus particulièrement les footballeurs.

En effet, la différence non significative signalée précédemment est essentiellement liée à l'échantillonnage très réduit mais si l'on considère les valeurs individuelles, elles permettent cependant de supposer la réalité de cette différence comme cela est confirmé pour les tranches d'âge supérieur où l'échantillonnage est plus important.

Pour ce qui est du métabolisme anaérobie alactique, nous avons déjà vu que l'entraînement même s'il est adapté au métabolisme envisagé n'améliore pas les résultats du test visant à mesurer la puissance maximale anaérobie (HOUSTON, 1977). Les différences notées entre les sports doivent donc être mises sur le compte d'une orientation préférentielle de l'individu selon ses aptitudes personnelles.

L'étude de l'effet de l'entraînement sur le métabolisme lactique n'est malheureusement pas possible avec les résultats dont nous disposons. On ne peut valablement comparer les résultats obtenus chez les garçons sportifs par rapport aux sédentaires car l'échantil-

l'effort témoin n'est pas représentatif d'une population non active et son effectif est réduit aux 10-11 ans. On peut seulement dire que la valeur de la dette maximale augmente avec l'âge de 10 à 15 ans chez les garçons mais qu'elle n'augmente que de 10 à 13 ans chez les filles. On peut expliquer ce fait comme dû soit à la poursuite de la croissance chez le garçon à 14-15 ans alors qu'elle s'arrête à 13 ans chez la fille, soit à l'effet de l'entraînement sur la capacité anaérobie lactique chez le garçon. L'étude de la tranche d'âge supérieure permettrait sans doute de trancher ce problème en mettant en évidence l'évolution après 15 ans mais elle n'a pu être réalisée dans ce travail.

CONCLUSIONS

Trois tests d'aptitude physique ont été étudiés sur deux populations d'enfants de la région lyonnaise âgés de 10 à 15 ans :

- d'une part, de jeunes sportifs choisis d'après leurs spécialités (natation, athlétisme, football) dans différents clubs sportifs ;
- d'autre part, de jeunes écoliers d'un milieu rural dont l'étude n'a pu porter que sur un effectif réduit de 10 à 11 ans.

Par ces tests, sont explorées les diverses ressources énergétiques musculaires et on recherche les différences qui caractérisent les métabolismes aérobie et anaérobies de l'enfant par rapport à ceux de l'adulte.

Du point de vue méthodologique, la détermination de la puissance maximale anaérobie et de la consommation maximale d'oxygène est pratiquée selon le même protocole que pour l'adulte. En revanche, la dette maximale d'oxygène est mesurée selon une méthode différente plus adaptée aux possibilités de l'enfant :

- la puissance de l'exercice supra maximal est fixée à 115 % de la puissance maximale aérobie ;
- le recueil des gaz expirés est pratiqué dès l'arrêt de l'exercice pendant 20 minutes, ce délai étant suffisant, chez les enfants de 10 à 15 ans, pour que la consommation d'oxygène redescende à son niveau basal ;
- le sang capillaire nécessaire au dosage de l'acide lactique est prélevé dès la deuxième minute en raison de la cinétique plus rapide.

L'analyse des résultats montre :

- une consommation maximale d'oxygène supérieure à la moyenne d'une population sédentaire de même âge et ceci même pour l'échantillon témoin ;
- une puissance maximale anaérobie qui augmente entre

10-11 et 12-13 ans en passant de 1,22 à 1,45 $\text{kgm.kg}^{-1}.\text{sec}^{-1}$ sans différence significative entre les sexes ;

- une dette maximale d'oxygène qui suit une évolution parallèle pour les enfants de 10 à 13 ans sans influence du sexe (2,00 l STPD à 10-11 ans et 3,03 l STPD à 12-13 ans). Alors que l'évolution semble se stabiliser chez les filles de 14-15 ans, elle continue très nettement chez les garçons pour atteindre 5,06 l STPD. On ne retient aucune influence du mode d'entraînement puisqu'il n'y a pas de différence significative de la dette maximale d'oxygène en fonction du sport pratiqué.

En somme, le métabolisme aérobie de l'enfant semble assurer presque à lui seul les besoins énergétiques lors de l'exercice alors que, progressivement au cours de l'enfance et de l'adolescence, les métabolismes anaérobies et particulièrement celui lié à la production d'acide lactique se développent essentiellement au moment de la puberté (12-13 ans chez les filles, 14-15 ans chez les garçons). Malheureusement, cette étude ne permet pas de conclure définitivement en particulier sur l'évolution de la dette maximale après la puberté jusqu'à l'âge adulte et sur l'influence de l'activité physique sur la dette maximale car la population témoin est d'une part limitée aux enfants de 10-11 ans et d'autre part non représentative d'une population "non active" car leur aptitude physique est supérieure à la moyenne.

Le Président de la Thèse
Professeur J.F. CIER

VU et PERMIS D'IMPRIMER
Lyon, le 2 septembre 1977

Le Président de l'Université
CLAUDE BERNARD LYON I

Le Directeur
de l'U.E.R LYON-NORD

Professeur Agrégé J.P. NEIDHARDT

Professeur D. GERMAIN

B I B L I O G R A P H I E

ALLEN (C.), BAR-OR (O.), DAVIES (C.T.M.), DEGRE (S.), HEDMAN (R.),
ISHII (K.), KANEKO (M.), LACOUR (J.R.), DI PRAMPERO (P.E.), SELIGER (C.),
et SHEPHARD (R.J.)

Community studies of working capacity in school children.
Malattie cardio-vascolari, X, n°1-2, 1-14.

..
ASMUSSEN (E.) et BOJE (O.)

Body temperature and capacity for work.
Acta Physiol. Scand., 1945, 10, 1-22.

ASTRAND (I.), ASTRAND (P.O.), CHRISTENSEN (E.H.) et HEDMAN (R.)

Myohemoglobin as an oxygen-store in man.
Acta Physiol. Scand., 1960, 48, 454-460.

ASTRAND (I.)

Aerobic work capacity. Its relation to age, sex and other
factors.
American Heart Association Monograph. 1967, 15, I-211 - I-217.

ASTRAND (P.O.) et SALTIN (B.)

Oxygen uptake during the first minutes of heavy work.
J. Appl. Physiol., 1961, 16, 971-976.

ASTRAND (P.O.) et CHRISTENSEN (E.H.)

Aerobic work capacity.
Oxygen in the animal organism, 1964, 295-303.
Dickens (F.) et NEIL (E.) Pergamon Press Oxford.

ASTRAND (P.O.) et RODAHL (K.)

Textbook of work physiology. Mc Graw Hill éd. New York. 1970
Traduit en français par J.R. LACOUR "Manuel de Physiologie
de l'exercice musculaire". Masson éd. Paris, 1973.

BARNARD (R.J.), GARDNER (G.W.), DIACO (N.V.), MAC ALPIN (R.N.) et
KATTUS (A.A.)

Cardio-vascular responses to sudden strenuous exercise-heart
rate, blood pressure and E.C.G.
J. Appl. Physiol., 1973, 34 (6), 833-837.

BELCASTRO (A.N.) et BONEN (A.)

Lactic acid removal rates during controlled and uncontrolled
recovery exercise.
J. Appl. Physiol., 1975, 39 (6), 932-936.

BERGSTROM (J.)

Local changes of ATP and phosphorylcreatine in human muscle
tissue in connection with exercise.
American Heart Association Monograph, 1967, 15, I.91 - I.98.

BOTTIN (J.L.)

Consommation maximale d'oxygène et données biométriques de
2 groupes d'écoliers, âgés de 11 à 16 ans, pratiquant ou on
une activité sportive.
Thèse Lyon 1977.

BROOKS (G.A.), HITTELMAN (K.J.), FAULKNER (J.A.) et BEYER (R.E.)

Temperature, skeletal muscle mitochondrial functions and
oxygen debt.
Am. J. Physiol., 1971, 220 (4), 1053-1059.

CERRETELLI (P.) et DI PRAMPERO (P.E.)

High energy phosphate resynthesis from anaerobic glycolysis
in muscle.
J. Physiol., 1969, 204, 115-116.

CERRETELLI (P.), AMBROSOLI (G.) et FUMAGALLI (M.)

Anaerobic recovery in man.
Europ. J. Appl. Physiol., 1975, 34, 141-148.

CORROL (V.A.) et CURETON (T.K.)

Variabilité des mesures d'aptitudes physiques dans différents
groupes d'âge.
Biométrie humaine, 1967, II, n°3-4, 93-119.

CRAIG (F.N.)

Oxygen uptake at the beginning of work.
J. Appl. Physiol., 1972, 33 (5), 611-615.

CUMMING (R.)

Correlation of athletic performance and aerobic power in 12 to 17 year old children with bone age, calf muscle, total body potassium, heart volume and two indices of anaerobic power.

Pediatric work physiology, 1972, 109-134.

DAVIES (C.T.M.) et CROCKFORD (G.W.)

The kinetics of recovery oxygen intake and blood lactic acid concentration measured to a baseline of mild steady work.

Ergonomics, 1971, 14 (6), 721-731.

DAVIES (C.T.M.), DI PRAMPERO (P.E.) et CERRETELLI (P.)

Kinetics of cardiac output and respiratory gas exchange during exercise and recovery.

J. Appl. Physiol., 1972, 32 (5), 618-625.

DENIS (C.)

Etude bioénergétique d'un sport collectif : le handball.
Thèse Lyon 1977.

DENOLIN (H.), SADOUL (P.) et ORIE (N.G.M.)

Exploration fonctionnelle pulmonaire.

Editions Médicales Flammarion, 1964.

DILL (D.B.), EDWARDS (H.T.), et TALBOT (J.H.)

Studies in muscular activity. VII - Factors limiting the capacity for work.

J. Physiol., 1933, 77, 49-62.

DI PRAMPERO (P.E.) et MARGARIA (R.)

Différentes composantes de la contraction de la dette d'oxygène.

J. Physiol. (Paris), 1969, 61 suppl. n°2, 378.

DI PRAMPERO (P.E.), DAVIES (C.T.M.), CERRETELLI (P.) et MARGARIA (R.)

An analysis of O₂ debt contracted in submaximal exercise.

J. Appl. Physiol., 1970, 29 (5), 547-551.

DI PRAMPERO (P.E.)

Energétique de l'exercice musculaire.

J. Physiol. (Paris), 1972, 65, 51 A - 86 A.

DI PRAMPERO (P.E.), PEETERS (L.) et MARGARIA (R.)

Alactic O₂ debt and lactic acid production after exhausting exercise in man.

J. Appl. Physiol., 1973, 34 (5), 628-632.

DÖBELN (W) von et ERIKSSON (B.O)

Physical training, maximal oxygen uptake and dimensions of the oxygen transporting and metabolizing organs in boys 11-13 years of age.

Acta Paediat. Scand., 1972, 61, 653-660.

- EKBLOM (B.)
Effect of physical training in adolescent boys.
J. Appl. Physiol., 1969, 27 (3), 350-355.
- EKBLOM (B.)
Effect of physical training on oxygen transport system of adolescents.
Acta Physiol. Scand., 1969, 77, 29-40.
- EKBLOM (B.)
Physical training in normal boys in adolescence.
Acta Paediat. Scand., 1971, Suppl. 217, 60-62.
- ERIKSSON (B.O.), KARLSSON (J.) et SALTIN (B.)
Muscle metabolites during exercise in pubertal boys.
Acta Paediat. Scand., 1971, Suppl. 217, 154-157.
- ERIKSSON (B.O.) et KOCH (G.)
Effect of physical training on hemodynamic response during submaximal and maximal exercise in 11-13-year old boys.
Acta Physiol. Scand., 1973, 87, 27-39.
- ERIKSSON (B.O.), GOLLNICK (P.D.) et SALTIN (B.)
Muscle metabolism and enzyme activities after training in boys 11-13 years old.
Acta Physiol. Scand., 1973, 87, 485-497.
- FLANDROIS (R.), PUCCINELLI (R.), HOUDAS (Y.) et LEFRANCOIS (R.)
Comparaison des consommations maximales d'oxygène mesurées et théoriques d'une population française.
J. Physiol. (Paris), 1962, 54, 337-338.
- FLANDROIS (R.), BRUNE (J.) et WIESENDANGER (T.)
Physiologie humaine : la respiration.
SIMEP Editeurs, 1976.
- FLANDROIS (R.) et LACOUR (J.R.)
Evolution des paramètres métaboliques et respiratoires au cours de l'exercice musculaire chez l'homme.
Bull. europ. Physiopath. resp., 1977, 13, 329-341.
- GISOLFI (C.), ROBINSON (S.) et TURRELL (E.S.)
Effects of aerobic work performed during recovery from exhausting work.
J. Appl. Physiol., 1966, 21 (6), 1767-1772.

- HERMANSEN (L.) et SALTIN (B.)
Oxygen uptake during maximal treadmill and bicycle exercise.
J. Appl. Physiol., 1969, 26 (1), 31-37.
- HERMANSEN (L.) et STENSVOLD (I.)
Production and removal of lactate during exercise in man.
Acta Physiol. Scand., 1972, 86, 191-201.
- HICKSON (R.C.), BOMZE (H.A.), et HOLLOSZY (J.O.)
Linear increase in aerobic power induced by a strenuous program
of endurance exercise.
J. Appl. Physiol., 1977, 42 (3), 372-376.
- HILL (A.V.), LONG (C.N.H.) et LUPTON (H.)
Muscular exercise, lactic acid and the supply and utilisation
of oxygen. Part V - The recovery process after exercise in
man.
Quart. J. Med., 1923, 16, 96-127.
- HILL (A.V.), LONG (C.N.H.) et LUPTON (H.)
Muscular exercise, lactic acid and the supply and utilisation
of oxygen. Part VI - The oxygen debt at the end of exercise.
Quart. J. Med., 1923, 16, 127-138.
- HOUSTON (M.E.) et THOMSON (J.A.)
The response of Endurance - Adapted adults to intense anaerobic
training.
Europ. J. Appl. Physiol., 1977, 36, 207-213.
- HOWALD (H.)
Auswirkungen sportlicher aktivität auf den stoffwechsel.
Schweiz. med. Wschr., 1974, 104, 1535-1536.
- HUCKABEE (W.E.)
Relationships of pyruvate and lactate during anaerobic
metabolism. II - Exercise and formation of O₂ debt.
J. Clin. Invest., 1958, 37, 255-263.
- HULTMAN (E.)
Physiological role of muscle glycogen in man, with special
reference to exercise.
American Heart Association Monograph., 1967, 15, I.99 - I.114.
- INBAR (O.), et BAR-OR (O.)
The effects of intermittent warm-up on 7-9 year old boys.
Europ. J. Appl. Physiol., 1975, 34, 81-89.
- KARLSSON (J.) et SALTIN (B.)
Lactate, ATP and CP in working muscles during exhaustive
exercise in man.
J. Appl. Physiol., 1970, 29 (5), 598-602.

KATCH (V.L.)

Kinetics of oxygen uptake and recovery for supra maximal work of short duration.

Int. Z. angew. Physiol., 1973, 31, 197-207.

KLIMT (F.), RUTENFRANZ (J.) et KNAUTH (P.)

Sport scolaire et physiologie du travail.

Médecine du sport, 1976, 50, 31-35.

KNUTTGEN (H.G.)

Oxygen debt, lactate, pyruvate and excess lactate after muscular work.

J. Appl. Physiol., 1962, 17 (4), 639-644.

KNUTTGEN (H.G.)

Oxygen debt after submaximal physical exercise.

J. Appl. Physiol., 1970, 29 (5), 651-657.

KOCH (G.) et ERIKSSON (B.O.)

Effect of physical training on pulmonary ventilation and gas exchange during submaximal and maximal work in boys aged 11 to 13 years.

Scand. J. Clin. Lab. Invest., 1972, 1-15.

KREBS (H.)

Oxygen in the animal organism.

Dickens (F.) et NEIL (E.) Ed. Pergamon Press Oxford, page 304.

MACEK (M.), VAVRA (J.) et NOVOSADOVA (J.)

Prolonged exercise in prepubertal boys. I - Cardiovascular and metabolic adjustment.

Europ. J. Appl. Physiol., 1976, 35 (4), 291-298.

MACEK (M.), VAVRA (J.) et NOVOSADOVA (J.)

Prolonged exercise in prepubertal boys. II - Changes in plasma volume and in some blood constituents.

Europ. J. Physiol., 1976, 35 (4), 299-303.

MARBACH (P.) et WEIL (M.H.)

Rapid enzymatic measurement of blood lactate and pyruvate.

Clin. Chemistry, 1967, 13, 314.

MARECHAL (G.)

Les sources d'énergie immédiates de la contraction musculaire.

J. Physiol. (Paris), 1972, 65, 5A - 50 A.

MARGARIA (R.), EDWARDS (H.T.) et DILL (D.B.)

The possible mechanisms of contracting and paying the oxygen debt and the role of lactic acid in muscular contraction.

Am. J. Physiol., 1933, 106, 689-715.

- MARGARIA (R.), CERRETELLI (P.), AGHEMO (P.) et SASSI (G.)
Energy cost of running.
J. Appl. Physiol., 1963, 18, (2), 367-370.
- MARGARIA (R.), CERRETELLI (P.), DI PRAMPERO (P.E.), MASSARI (C.) et TORELLI (G.)
Kinetics and mechanism of oxygen debt contraction in man.
J. Appl. Physiol., 1963, 18 (2), 371-377.
- MARGARIA (R.), CERRETELLI (P.) et MANGILI (F.)
Balance and kinetics of anaerobic energy release during strenuous exercise in man.
J. Appl. Physiol., 1964, 19 (4), 623-628.
- MARGARIA (R.), AGHEMO (P.) et ROVELLI (E.)
Measurement of muscular power (anaerobic) in man.
J. Appl. Physiol., 1966, 21 (5), 1662-1664.
- MARGARIA (R.)
Anaerobic metabolism in muscle.
Canadian Medical Association Journal, 1967, 96, 770-774.
- MARGARIA (R.)
Capacity and power of the energy processes in muscle activity: their practical relevance in athletics.
Int. Z. angew Physiol. einschl. Arbeitsphysiol., 1968, 25, 352-360.
- MARGARIA (R.), OLIVA (R.D.), DI PRAMPERO (P.E.) et CERRETELLI (P.)
Energy utilization in intermitted exercise of supra maximal intensity.
J. Appl. Physiol., 1969, 26 (6), 752-756.
- MARGARIA (R.), DI PRAMPERO (P.E.), AGHEMO (P.), DEREVENCO (P.) et MARIANI (M.)
Effect of a steady-state exercise on maximal anaerobic power in man.
J. Appl. Physiol., 1971, 30 (6), 885-889.
- MARGARIA (R.), AGHEMO (P.) et SASSI (G.)
Lactic acid production in supramaximal exercise.
Pflügers Arch., 1971, 326, 152-161.
- MC KAY (G.A.) et BANISTER (E.W.)
A comparison of maximum O₂ uptake determination by bicycle ergometry at various pedaling frequencies and by treadmill running at various speeds.
Europ. J. Appl. Physiol., 1976, 35 (3), 191-200.

MC KAY (G.A.) et BANISTER (E.W.)

A comparison of maximum O₂ uptake determination by bicycle ergometry at various pedaling frequencies and by treadmill running at various speeds.

Europ. J. Appl. Physiol., 1976, 35 (3), 191-200.

MC MIKEN (D.F.)

Oxygen deficit and repayment in submaximal exercise.

Europ. J. Appl. Physiol., 1976, 35 (2), 127-136.

NAGLE (F.J.), HAGBERG (J.) et KAMEI (S.)

Maximal O₂ uptake of boys and girls-ages 14-17.

Europ. J. Appl. Physiol., 1977, 36 (2), 75-80.

PIIPER (J.), DI PRAMPERO (P.E.) et CERRETELLI (P.)

Oxygen debt and high-energy phosphates in gastrocnemius muscle of the dog.

Am. J. Physiol., 1968, 215 (3), 523-531.

PIIPER (J.) et SPILLER (P.)

Repayment of O₂ debt and resynthesis of high-energy phosphates in gastrocnemius muscle of the dog.

J. Appl. Physiol., 1970, 28 (5), 657-662.

QUARD (S.), ECLACHE (J.P.) et FLANDROIS (R.)

Aspect technique et intérêt du dosage de l'acide lactique pour le contrôle de l'intensité d'un exercice.

Communication présentée au Congrès International de Médecine Sportive de Nice, 20 mai 1977.

SALTIN (B.) et HERMANSEN (L.)

Esophageal, rectal and muscle temperature during exercise.

J. Appl. Physiol., 1966, 21 (6), 1757-1762.

SALTIN (B.) et ASTRAND (P.O.)

Maximal oxygen uptake in athletes.

J. Appl. Physiol., 1967, 23, 353.

SCHNEIDER (E.G.), ROBINSON (S.) et NEWTON (J.L.)

Oxygen debt in aerobic work.

J. Appl. Physiol., 1968, 25 (1), 58-62.

SHEPHARD (R.J.), ALLEN (C.), BAR-OR (O.), DAVIES (C.T.M.), DEGRE (S.), HEDMAN (R.), ISHII (K.), KANEKO (M.), LACOUR (J.R.), DI PRAMPERO (P.E.) et SELIGER (V.)

The working capacity of Toronto school children. Part I.
Canadian medical association journal, 1969, 100, 560-566.

SHEPHARD (R.J.), ALLEN (C.), BAR-OR (O.), DAVIES (C.T.M.), DEGRE (S.), HEDMAN (R.), ISHII (K.), KANEKO (M.), LACOUR (J.R.), DI PRAMPERO (P.E.), et SELIGER (V.)

The working capacity of Toronto school children. Part II.
Canadian medical association journal, 1969, 100, 705-714.

- SHEPAHRD (R.J.)
Frontiers of fitness.
Charles C. Thomas Ed., 1971.
- STEPLOCK (D.A.), VEICSTEINAS (A.) et MARIANI (M.)
Maximal aerobic and anaerobic power and stroke volume of the heart in a subalpine population.
Int. Z. angew Physiol., 1971, 29, 203-214.
-
SZOGY (A.) et CHEREBETIU (G.)
A 1 min bicycle ergometer test for determination of anaerobic capacity.
Europ. J. Appl. Physiol., 1974, 33, 171-176.
- VOLVOK (N.I.), SHIRKOVETS (E.A.) et BORILKEVICH (V.E.)
Assessment of aerobic and anaerobic capacity of athletes in treadmill running tests.
Europ. J. Appl. Physiol., 1975, 34, 121-130.
- WASSERMAN (K.), BURTON (G.G.) et VAN KESSEL (A.L.)
Excess lactate concept and oxygen debt of exercise.
J. Appl. Physiol., 1965, 20 (6), 1299-1306.
- WHIPP (B.J.), SEARD (C.) et WASSERMAN (K.)
Oxygen deficit-oxygen debt relationships and efficiency of anaerobic work.
J. Appl. Physiol., 1970, 28 (4), 452-456.
- WHIPP (B.J.) et WASSERMAN (K.)
Oxygen uptake kinetics for various intensities of constant-load work.
J. Appl. Physiol., 1972, 33 (3), 351-356.
- WILMORE (J. M.)
Influence of motivation on physical work capacity and performance.
J. Appl. Physiol., 24 (4), 459-463.
- YAMAJI (K.) et MIYASHITA (M.)
Oxygen transport system during exhaustive exercise in Japanese boys.
Europ. J. Appl. Physiol., 1977, 36 (2), 93-99.

